

Ortsaufgelöste Charakterisierung
in der Photovoltaik
mit der CELLO-Technik
(Solar Cell Local Characterization)

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel



Technische Fakultät
Lehrstuhl für Allgemeine Materialwissenschaft

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaft (Dr.-Ing.)
an der Technischen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von

ANDREAS SCHÜTT

Kiel, Februar 2015

1. Gutachter:	Prof. Dr. Helmut Föll
2. Gutachter:	Prof. Dr. George Popkirov
3. Gutachter:	Prof. Dr. Rainer Adelong
Prüfungsvorsitz:	Prof. Dr. Klaus Rätzke
Datum der mündlichen Prüfung:	20.02.2015

*„Die Sonne bringt Wärme und das Licht,
aber Schatten, den bringt sie nicht.“*

Deutsches Sprichwort

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	v
Abbildungsverzeichnis	v
1 Einleitung	1
1.1 Wachstumspotential des PV-Marktes	3
1.2 Kosteneinflussgrößen des PV-Stroms	4
1.2.1 Einfluss von Zelleffizienz	5
1.2.2 Einfluss der Haltbarkeit	10
1.2.3 Konsequenzen für Charakterisierungstechniken	12
2 Theoretische Grundlagen	13
2.1 Analyse integraler Kennliniendaten	13
2.2 Analyse des Serienwiderstands	14
2.3 Analyse des Photostroms: Photoimpedanz	15
2.3.1 Einfluss angelegter mechanischer Spannung	19
2.3.2 Messung von Inhomogenitäten in RC	20
2.4 Analyse von Messungen der zweiten Harmonischen	21
2.5 Injektionslevelabhängigkeiten des Photostroms	22
2.6 „Parasitic shunting“	23
2.7 Prozessierungsschritte von Standard-Si-Solarzellen	23
2.8 Potential-induzierte Degradation (PID) bei Modulen	24
3 Experimentelles	27
3.1 Messprinzip	27
3.2 Hauptkomponenten der Hardware	28
3.2.1 CELLO-Einheit	29
3.2.2 Software-Lock-in-Verstärker	34
3.2.3 Optik: Konfokaler Scan mit vier Lasern	34
3.3 Messmodi	38
3.3.1 Standard-Modus	38
3.3.2 Photoimpedanz-Modus	40
3.4 Details zu den durchgeführten Messungen	42
3.4.1 Durch mechanische Spannung induzierte Effekte	42
3.4.2 Durch Co-Feuern hervorgerufene Inhomogenitäten	42
3.4.3 „Parasitic shunting“ bei Zellen mit Rückseitenpassivierung	43

3.4.4	Charakterisierung von Tandemsolarzellen	44
3.4.5	Untersuchungen zu PID und Regeneration bei Modulen	45
4	Messergebnisse und Diskussion	47
4.1	Durch mechanische Spannung induzierte Effekte	47
4.1.1	Verbiegen einer Solarzelle	47
4.1.2	Qualitative Analyse	47
4.1.3	Quantitative Analyse	50
4.1.4	Einfluss der Vakuumaufspannvorrichtung	50
4.1.5	Resultierende Verbesserungen des CELLO-Messaufbaus	53
4.1.6	Fazit	53
4.2	Inhomogenitäten durch Co-Feuern	55
4.2.1	Messstrategie	55
4.2.2	R_{SER} und $R_{SER}C$ -Zeitkonstanten	55
4.2.3	Rekombinationsverluste	58
4.2.4	Co-Feueroptimierung	58
4.2.5	Fazit	59
4.3	„Parasitic shunting“ rückseitenpassivierter Zellen	60
4.3.1	Photostromverluste aufgrund von „Parasitic shunting“	60
4.3.2	$R_{SER}C$ -Effekte aufgrund von „Parasitic shunting“	62
4.3.3	Fazit	66
4.4	Charakterisierung von Tandemsolarzellen	67
4.4.1	Messungen mit jeweils einem intensitätsmodulierten Laser	68
4.4.2	Zwei simultane Perturbationsfrequenzen	71
4.4.3	Auswirkungen auf den CELLO-Aufbau	74
4.4.4	Fazit	74
4.5	PID und Regeneration bei Modulen	75
4.5.1	Degradationsvorgänge	75
4.5.2	Regenerationsvorgänge	78
4.5.3	Einfluss der EVA-SiN-Grenzfläche	80
4.5.4	Fazit	81
5	Zusammenfassung	83
A	Beispieldatensätze	87
A.1	Illustration: hohe Orstauflösung	87
A.2	Standard-Modus: Mess- und Auswertedatensatz	90
A.3	Photoimpedanzmessungen	92
B	Co-Feueroptimierung	97
B.1	Einfache Voruntersuchungen	97
B.2	Fitresultate	99
B.3	Fitmodell „SRC3x3“	100
B.4	Fitmodell „tSRC1“	108
C	Vermessung von Nichtlinearitäten	115
C.1	Komplettdatensatz der Tandemsolarzelle	115
C.2	Einfluss von Lüftervibrationen	117

D Untersuchungen zu PID und Regeneration	119
D.1 Beispielhafte Berechnung eines Calc1-Datensatzes	119
D.2 Übersichten von Standardbildern	121
Literaturverzeichnis	131
Danksagung	133
Eidesstattliche Erklärung	135
Kurzfassung in Deutsch	139
Kurzfassung in Englisch	140
Lebenslauf	141

Tabellenverzeichnis

1.1	Simulationsparameter für Berechnung der Modulkosten	6
3.1	Namen und Dateinamenserweiterung: Standard-Modus	40
3.2	Dateinamenserweiterungen und Namen der Photoimpedanzmessung . . .	41
4.1	Klassifizierung des Al-Rückseitenkontakts	65
B.1	Lokale Fitparameter der hier verwendeten Fitmodelle	99
B.2	Probenübersicht Photoimpedanzanalyse	99

Abbildungsverzeichnis

1.1	Stromproduktion der Erneuerbaren Energien aufgrund des EEG	3
1.2	Hauptkosteneinflussgrößen auf die Wertschöpfungskette eines Solarmoduls .	5
1.3	Einfluss von Zelleffizienz und „Feedstock“-Preis auf die Modulkosten	7
1.4	Kostenbestandteile eines PV-Systems als Funktion der Moduleffizienz	9
1.5	Zusätzlicher Energieertrag durch bessere Haltbarkeit	11
2.1	Ersatzschaltbilder des Ein- und Zwei-Dioden-Modells	13
2.2	Schema zur Bestimmung des Serienwiderstands	15
2.3	Vereinfachtes linearisiertes Ersatzschaltbild zur Serienwiderstandsbestim- mung	16
2.4	Generationsrate als Funktion von x und Wellenlänge	16
2.5	Vereinfachtes Schema einer Solarzelle	17
2.6	„Spectral Response“ einer konventionellen Solarzelle	18
2.7	Ersatzschaltbilder für Solarzellen	20
2.8	Temperaturprofil des Co-Feuerschritts	25
3.1	CELLO-Messprinzip	28
3.2	I - V -Kennlinie mit zusätzlichem Kleinsignal	29
3.3	Hauptkomponenten der Hardware und verschiedene Feedback-Schleifen . .	30
3.4	CELLO-Aufbau und Kontaktierungseinheit	31
3.5	CELLO-Einheit	32
3.6	Perturbations- und Antwortsignale verschiedener Frequenzen	33
3.7	Schema der Optik mit vier konfokalen Lasern	35
3.8	Linienescans zur Berechnung der Fokusfleckgröße	37
3.9	Fokusfleckgröße aller Laser als Funktions der Position der Fokuslinse	37
3.10	Verschiedene Punkte entlang der Kennlinie	39
3.11	USB-Mikroskop	41
3.12	Prozessequenz von Zellen mit Rückseitenpassivierung	44
4.1	Mechanisch verspannte Zelle: Seitenansicht und Messung	48
4.2	Abhängigkeit der Phasenverschiebung von der Wellenlänge des Lasers	49
4.3	Messwerte und Fitergebnisse einer intrinsisch verspannten Zelle	51
4.4	Mechanisch verspannte Solarzellen	52
4.5	Effekte vom Entgraten der Vakuumlöcher der Aufspannvorrichtung	54
4.6	Fit von $R_{SER}C$ des Serienwiderstandes	56
4.7	S_b -Bilder für 1800 mm/min und variierten T_p	57
4.8	Amplitudenbilder mit variiertes globaler Beleuchtung	60
4.9	Linienescans mit Hochoflösung	61

4.10	Bilder von verschiedenen SIR-Laser-Messungen einer rückseitenpassivierten Zelle	61
4.11	Schema der Bedingung zum Schließen der Inversions-Schicht	63
4.12	Einfluss von rückseitigem R_{SER} auf S_b	64
4.13	Abschattungsexperimente	65
4.14	Auswertung des Rückseitenkontakts	65
4.15	Messsätze mit konstanten Intensitäten	67
4.16	Messsätze mit ausgeschalteter Zusatzbeleuchtung	68
4.17	Blue/IR-Amplitudenverhältnisbild	69
4.18	Messdatensätze mit simultaner Laserbeleuchtung	70
4.19	Signal einer Multifrequenzantwort	71
4.20	Amplitudenverhältnisbild des blauen Lasers zwischen drittem und erstem Messsatz	72
4.21	Amplitudenverhältnisbild des IR Lasers zwischen drittem und erstem Messsatz	73
4.22	Nichtlinearitäten durch Lüftervibrationen: Photostrombild	73
4.23	R_{shunt} -Werte vom Kennlinienfit	75
4.24	Verhältnis von CELLO-Bildern von Zelle 2 mit starkem PID	77
4.25	CELLO-Bilder von Zelle 3 mit starkem PID	78
4.26	CELLO-Bilder von Zelle 4 mit starkem PID	79
4.27	Illustration der Modul-Sandwich-Struktur	81
A.1	Photostrom-Amplitudenbild mit großer Auflösung	88
A.2	Zoombild des weißmarkierten Rechtecks in Abb. A.1	89
A.3	Standard-Modus: Messdaten	90
A.4	Standard-Modus: Auswertedaten	91
A.5	Zellimpedanz	92
A.6	Beispiel Stromkorrektur	93
A.7	Für den Fit vorbereiteter Beispieldatensatz des RED-Lasers	94
A.8	Für den Fit vorbereiteter Beispieldatensatz des IR-Lasers	95
A.9	Für den Fit vorbereiteter Beispieldatensatz des SIR Lasers	96
B.1	Einfache Voruntersuchungen: Analyse der Bilder der Phasenverschiebung am Beispiel der Zelle Nr. 107	97
B.2	Einfache Voruntersuchungen: Vergleich von Bildern mit unterschiedlicher Laserwellenlänge bei höchster Modulationsfrequenz	98
B.3	Fitergebnisse von Zelle Nr. 101 für die Modellfunktion „SRC3x3“	101
B.4	Fitergebnisse von Zelle Nr. 169 für die Modellfunktion „SRC3x3“	102
B.5	Fitergebnisse von Zelle Nr. 102 für die Modellfunktion „SRC3x3“	103
B.6	Fitergebnisse von Zelle Nr. 171 für die Modellfunktion „SRC3x3“	104
B.7	Fitergebnisse von Zelle Nr. 104 für die Modellfunktion „SRC3x3“	105
B.8	Fitergebnisse von Zelle Nr. 107 für die Modellfunktion „SRC3x3“	106
B.9	Fitergebnisse von Zelle Nr. 111 für die Modellfunktion „SRC3x3“	107
B.10	Fitergebnisse von Zelle Nr. 101 für die Modellfunktion „tSRC1“	108
B.11	Fitergebnisse von Zelle Nr. 169 für die Modellfunktion „tSRC1“	109
B.12	Fitergebnisse von Zelle Nr. 102 für die Modellfunktion „tSRC1“	110
B.13	Fitergebnisse von Zelle Nr. 171 für die Modellfunktion „tSRC1“	111

B.14	Fitergebnisse von Zelle Nr. 104 für die Modellfunktion „tSRC1“	112
B.15	Fitergebnisse von Zelle Nr. 107 für die Modellfunktion „tSRC1“	113
B.16	Fitergebnisse von Zelle Nr. 111 für die Modellfunktion „tSRC1“	114
C.1	Vibrationen: Komplett-Messdatensätze mit simultaner Laserbeleuchtung .	116
C.2	Nichtlinearer Einfluss von Lüftervibrationen auf „Current matching“	117
D.1	PID in Originaldaten und in Verhältnisbildern	120
D.2	Übersicht von Calc1 für alle Zellen	121
D.3	Übersicht von Calc2 für alle Zellen	122
D.4	Übersicht von Calc3 für alle Zellen	123
D.5	Übersicht von Calc4 für alle Zellen	124
D.6	Vergleich Serienwiderstand vor und nach Modulverkapselung	125

Kapitel 1

Einleitung

Motivation Der Bericht des „Club of Rome“ „Die Grenzen des Wachstums“ [1] machte vielen Menschen klar, dass die globalen Ressourcen limitiert sind und ein „Umdenken“ zu nachhaltigerem Wirtschaften notwendig ist. Passiert ist leider so gut wie nichts, wie z. B. das „Limits to Growth – The 30-Year Update“ [2] belegt, sodass sich die Welt weiter auf dem „Business as usual“-Szenario befindet, welches die Erde bald an ihre Grenzen stoßen lässt.

Zwei Hauptaspekte dabei sind a) die Limitierung fossiler Energieressourcen („Peak Oil“) und b) die Limitierung der in der Atmosphäre deponierbaren Menge an Kohlendioxid (Treibhauseffekt, Klimawandel). Beides impliziert gewaltige Herausforderungen. Der vielbeachtete Hirsch-Report [3] legt dar, welche Risiken in „Peak Oil“ stecken und schlägt sofortiges Handeln vor. Die Auswirkungen der vom Menschen emittierten Treibhausgase auf das Klima sind sehr genau in den Berichten des „Intergovernmental Panel on Climate Change“ (IPCC) [4, 5] beschrieben. Konsequenzen des Klimawandels für die Wirtschaft, wie im Stern-Report [6] behandelt, erfordern ebenfalls dringendes, sofortiges Handeln.

Verschiedenste Handlungsstrategien, verfasst als Reaktion auf den Bericht des „Club of Rome“, sind in [7] zu finden. Eine herausragende Rolle in der Lösung der beschriebenen Probleme spielt die Photovoltaik (PV). Sie vereint folgende Vorteile: Sie ist erneuerbar, also quasi unendlich verfügbar, sie emittiert vernachlässigbare Mengen an Treibhausgasen, sie ist dezentral verfügbar, die möglichen Wachstumsraten der PV-Industrie sind hinreichend groß, um schnell als globale Lösung zur Verfügung zu stehen, und sie ist schon heute so kostengünstig, dass sie an ausgewählten Standorten mit konventionellen, fossilen Energieträgern konkurrieren kann. Für ein noch umfangreicheres PV-Wachstum und eine noch tiefere Durchdringung des Energiemarktes mit PV ist es notwendig, die Kosten des PV-Stroms noch weiter zu senken. Dies kann durch eine Verbesserung der Standardzellprozesse geschehen (weniger Defekte erlauben höhere Wirkungsgrade) durch neue Zellkonzepte wie Dünnschicht- oder Stapelsolarzellen oder durch eine Verlängerung der Haltbarkeit. Im Rahmen dieser Arbeit wird mit Hilfe der orts aufgelösten Charakterisierungstechnik CELLO („Solar cell local characterization“) gezeigt, wie sich diese Strategien umsetzen lassen.

Aufbau der Arbeit Nach den theoretischen Grundlagen in Kapitel 2 folgen im Experimententeil in Kapitel 3 Details zur CELLO-Hardware und zu den CELLO-Messprozeduren. Der Ergebnis- und Diskussionsteil der Arbeit in Kapitel 4 ist in fünf Abschnitte gegliedert:

Zuerst liegt der Fokus auf der Verbesserung der CELLO-Messtechnik für Standard-Si-

Solarzellen. Es werden Photoimpedanzmessungen an mechanisch verspannten Si-Solarzellen vorgenommen und mit dafür entwickelten Modellen quantitativ ausgewertet (Abschnitt 4.1). So ist es möglich, die Bandlückenänderung aufgrund mechanischer Verspannung mit zu berücksichtigen, sodass die Ergebnisse nicht nur quantitativ ausgewertet werden können, sondern auch zukünftig mit überprüft werden kann, ob Zellen mechanisch verspannt sind.

Darauf folgen systematische Untersuchungen von Zellen mit variierten Parametern des Co-Feuerschrittes (Abschnitt 4.2), welche helfen, den Zellprozess zu optimieren. Die Co-Feuerprozessparameter, wie die Wahl der Pasten, Bandgeschwindigkeit des Ofens (was die Heizzeit bestimmt) und Temperaturprofil (besonders charakterisiert durch die Peaktemperatur), bestimmen nicht nur die offensichtlichen Zellparameter, wie ohmsche Front- und Rückseitenkontakte, sondern auch wesentliche Effekte zweiter Ordnung. Diese sind „Hydrogenation“ (Passivierung durch Wasserstoff), Gettern (was stark die Volumenrekombination beeinflusst) und die Bildung des „back surface field“ (BSF), welches die Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit S_b auf der Rückseite bestimmt. Hier werden hauptsächlich Bilder von S_b und dem Serienwiderstand R_{SER} benutzt, um deren Abhängigkeit von zwei Co-Feuerparametern, Peakfeuertemperatur T_p und Bandgeschwindigkeit, zu analysieren.

Dann folgt die Charakterisierung dünnerer rückseitig passivierter Si-Zellen mit höheren Wirkungsgraden (Abschnitt 4.3). Es ist wohlbekannt, dass Konzepte der Rückseitenpassivierung, welche eine Verarmungszone („depletion layer“) verwenden, Opfer von „Parasitic shunting“ werden können, d. h. aus der Verarmungszone wird eine Inversionsschicht mit erhöhter Oberflächenrekombination und Rekombination des Majoritätsstromes (d. h. parasitäre Shunts). Dies wird in diesem Abschnitt systematisch an ausgewählten Zellen unter Verwendung der CELLO-Technik analysiert.

Danach werden mit a-Si/ μ -Si-Tandemsolarzellen erstmals Tandemsolarzellen charakterisiert (Abschnitt 4.4). Da in Mehrfachstapelzellen mehrere Teilzellen in Serie verschaltet sind, ist „Current matching“ von allen Teilzellen notwendig für eine optimale Leistung, d. h. beide Teilzellen im (lokalen) Strompfad sollten die gleiche Menge an Photostrom generieren. Die neue Methode, welche in dieser Arbeit vorgestellt wird, verwendet simultan erzeugte Photoströme in beiden Teilzellen und die Charakterisierung von deren nicht linearen Wechselwirkung durch Analyse der zweiten Harmonischen, was z. B. die Untersuchung von „Current matching“ und anderen nicht linearen Effekten erlaubt.

Abschließend werden Zellen und Minimodule hinsichtlich potentialinduzierter Degradation (PID) und ihrer Regeneration untersucht (Abschnitt 4.5). Es wurde früher beobachtet, dass die Wahl der Modulverkapselungsfolie (EVA-Folie) sowie die Qualität der Siliziumnitrid Antireflexionsbeschichtung drastisch das Auftreten von PID und somit die Haltbarkeit der Solarmodule beeinflusst. In dieser Arbeit werden als Ergebnisse präsentiert, dass der Laminierungsprozess selbst und auch die Oberflächentopologie der Solarzelle PID fördern können. Die Kombination der experimentellen Ergebnisse mit der eben beschriebenen mikroskopischen Anschauung resultiert in einem vorgeschlagenen Modell, welches einige Konzepte zur Vermeidung von PID vorschlägt.

Der nachfolgende Teil der Einleitung soll die Einführung um ein paar weitere Details bereichern. Nachdem zuerst illustriert wird, dass die Photovoltaik das Potential hat, aufgrund ihrer sehr hohen möglichen Zuwachsraten die Elektrizitätsversorgung zu revolutionieren, werden die Hauptbestandteile der PV-Elektrizitätskosten diskutiert. Es wird

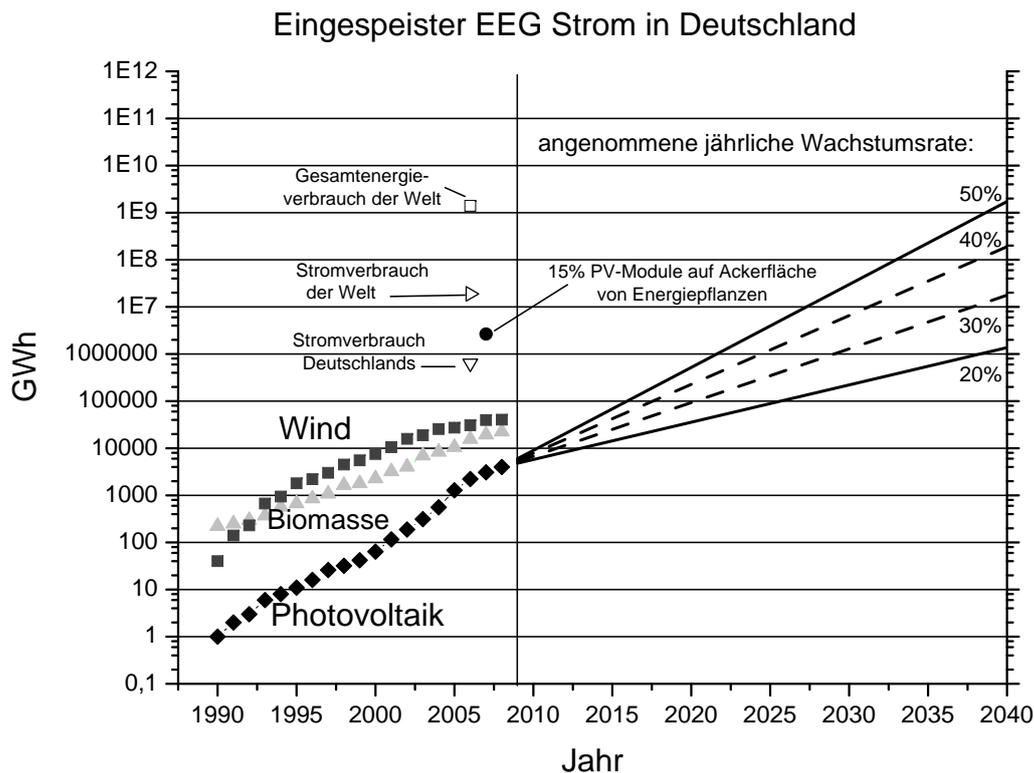


Abb. 1.1: Stromproduktion der Erneuerbaren aufgrund des EEG [8, 9].

gezeigt, dass die Zelleffizienz und die Haltbarkeit die Kosten wesentlich beeinflussen und somit beide im Fokus der Solarzellencharakterisierung stehen müssen. Dies sind persönliche Erkenntnisse, welche mich auch für diese Arbeit motiviert haben. Dem eiligen Leser steht es frei, den folgenden restlichen Teil des Einleitungskapitels zu überspringen und mit dem Theorieteil fortzufahren.

1.1 Wachstumspotential des PV-Marktes

Abbildung 1.1 zeigt den Einfluss des deutschen Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) auf die Elektrizitätsversorgung während der letzten Jahre. Alle Erneuerbaren sind exponentiell gewachsen. Besonders die Photovoltaikindustrie war imstande, enorme Wachstumsraten der gesamten Welt-PV-Produktion zu schultern (d. h. in der Größenordnung von 40 % bis 60 % pro Jahr für die letzten zwanzig Jahre!!!). Die Wachstumsraten der PV waren viel höher als die anderer Erneuerbarer. Sollte sich das Wachstum der PV in gleichem Maß so weiter fortsetzen, wird es möglich sein, den heutigen Gesamtenergiebedarf in einigen Dekaden zu decken, wie in Abb. 1.1 dargestellt. Für solch ein Szenario der Komplettversorgung müssten natürlich noch Methoden entwickelt werden, die es ermöglichen, den PV-Strom zu speichern. Diese würden es erlauben, den erneuerbaren PV-Strom auch im Transport- oder Wärmesektor zu verwenden. Folgendes Beispiel soll verdeutlichen, dass es genug freie Fläche für PV in Deutschland gibt, welches sehr dicht besiedelt ist, mit der Sonnenein-

strahlung von Südalaska: Falls die deutsche Fläche für Energiepflanzen¹ mit PV-Modulen mit 15 % Wirkungsgrad belegt würde, könnte mehr als der deutsche Elektrizitätsbedarf durch PV-Strom gedeckt werden (vgl. Abb. 1.1). Zugleich illustriert diese Beispiel auch, welch enormes Potential die PV besitzt, um den zwei Hauptherausforderungen unserer Zeit zu lösen: a) das baldige Versiegen der fossilen Energiequellen ([2, 10, 11, 12]), b) den Klimawandel ([6, 5, 4]).

Zur Zeit (2014) ist die Größe des globalen PV-Marktes hauptsächlich noch durch politische Rahmenbedingungen bestimmt, wie durch Steuervergünstigungen oder Einspeisetarife (wie das EEG). Allerdings könnte die Marktgröße explodieren und sich PV als gleichberechtigter Spieler im freien Elektrizitätsmarkt etablieren, wenn die Kosten des PV-Stroms

1. Netzparität erreichen (d. h. gleichziehen mit den Kosten für Haushaltsstrom),
2. „Fuel parity“ erreichen (d. h. gleichziehen mit den Kosten für die fossile [ölbasierte] Elektrizitätserzeugung in ölfreien sonnenreichen Staaten),
3. „Utility parity“ erreichen (d. h. gleichziehen mit den Kosten für die Stromproduktion eines Kohlekraftwerks). Kohlekraftwerke bilden das Rückgrat der fossilen Elektrizitätsversorgung. Weitere wichtige Parameter für „utility parity“ sind neben den Kosten für PV-Strom die Kosten für Kohle, Transport und Kosten für Kohlendioxidverschmutzungszertifikate.

Somit erlauben weitere Kostensenkungen des PV-Stroms gleichzeitig das Entstehen neuer Märkte, was wiederum hohe Wachstumsraten erlaubt.

Was sind die Hauptkosten des PV-Stroms? Die Kostenanteile von Wartung und Instandhaltung von PV-Strom sind vernachlässigbar klein. Auch fallen keine laufenden Brennstoffkosten wie bei fossilen Kraftwerken an, weil der Sonnenschein überall gratis zur Verfügung steht. Somit sind die Kosten hauptsächlich einmalige Investitionskosten für den Kauf und Aufbau eines PV-Systems.

1.2 Kosteneinflussgrößen des PV-Stroms

Da kristalline Si-Solarzelltechnologie mit ungefähr 85 % Marktanteil den Markt dominiert, ist sie zugleich auch die Referenz, um den PV-Strompreis zu bestimmen. Der Standard-Prozess mit den Hauptkosteneinflussgrößen ist vereinfacht dargestellt in Abb. 1.2. In Kürze:

1. Reines polykristallines Si-Material („Feedstock“) wird durch den Siemensprozess produziert.
2. Das „Feedstock“ wird geschmolzen und durch gerichtete Erstarrung (multikristallines Material) oder durch das Czochralski-Verfahren (monokristallines Material) ein Kristall geformt. Dieser wird dann zu Wafern geschnitten (mit Drahtsägen oder Diamantsägen) und zuletzt gereinigt.

¹Das sind die Pflanzen, welche nicht zur Nahrungsmittelherstellung verwendet werden, sondern für die Produktion von Kraftstoffen, Gas, etc. Die Fläche machte mit 2,53 Mio. ha. ca. ein fünftel der deutschen Ackerfläche aus.

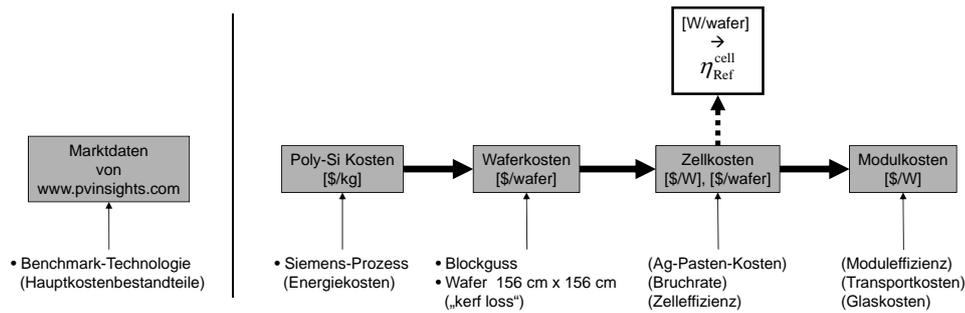


Abb. 1.2: Hauptkosteneinflussgrößen auf die Wertschöpfungskette eines kristallinen Si-Solarmoduls [13].

- Die Hauptstufen der Zellherstellung sind: Wafer werden texturiert, dotiert, antireflexbeschichtet und Ag-Pasten und Al-Pasten auf Front- und Rückseite gedruckt und zu Metallkontakten gesintert. Die Bruchrate der Zellen bei der Produktion sowie die teuren Ag-Pasten tragen sehr stark zu den Zellproduktionskosten bei.
- Hauptstufen der Modulerstellung: 60 Zellen werden zu sog. „Strings“ verlötet, diese eingekapselt durch Laminierung² und Al-Rahmen und Verbindungsstecker angebracht.

Entlang der gesamten Wertschöpfungskette gibt es vertikal integrierte Marktteilnehmer, also Firmen, welche alle Prozessschritte im eigenen Hause haben, wie auch spezialisierte Teilnehmer, welche sich auf Teilprodukte wie z. B. auf Feedstock-, Wafer-, Zell- oder Modulproduktion fokussieren. Es hat sich ein Markt für diese Teilprodukte etabliert. Plattformen wie [13] liefern aktuelle Preise.

In den nächsten zwei Unterabschnitten werden solche Marktdata genutzt, um den Einfluss einiger Teilkosten der Hauptprozesse auf den PV-Strompreis zu modellieren.

1.2.1 Einfluss von Zelleffizienz

Vom „Feedstock“-Preis zu Modulkosten

Die Preisdaten für Feedstock- und Waferpreise können durch folgende Gleichung beschrieben werden³:

$$\frac{\text{PolyCst}}{\text{WafrCst}} = 26,4877 \frac{\text{wafer}}{\text{kg}} \quad (1.1)$$

Hierbei beschreibt „PolyCst“ die Kosten des Polysiliziums in \$/kg und „WafrCst“ die Kosten eines Wafers in \$. Die Gleichung beschreibt, wieviele Wafer von 1 kg Si erhalten werden können. Somit werden aus 1 kg Si ungefähr 26 Zellen produziert, die Materialverluste setzen sich aus Verlusten beim Zuschneiden der gegossenen Blöcke und aus Verlusten beim Schneiden der Wafer („kerf loss“) zusammen. Dies repräsentiert den Stand der Technik bei 150 μm Waferdicke.

²im Sandwich Frontschutzglas, transparente EVA-Folie, Zellen, EVA, Rückseitenfolie.

³Marktdata von [13] für einen „Feedstock“-Preisbereich von 30–80 \$/kg. Die Gleichung wurde unabhängig verifiziert durch Daten des Interimreports der Firma GCL Poly [14].

Name	Variable	Einheit	Wert ^a	Quelle
Poly-Si-,Feedstock“-Kosten	PolyCst	\$/kg	28,6	<i>Variable</i> ^b
Wafer-Kosten	WafrcSt	\$/wafer	1,131	von Gl. (1.1)
Kosten des Zellprozesses	CellPrccSt	\$/wafer	0,889 ^c	[13]
Kosten des Modulprozesses	ModPrccSt	\$/W	0,46 ^d	[13]
Leistung pro Zelle	PpCell	W/wafer	4,04 ^e	[13]
Zell-Effizienz-Benchmark-Verhältnis	$\eta^{\text{cell}}/\eta_{\text{Ref}}^{\text{cell}}$	–	$\eta_{\text{Ref}}^{\text{cell}} = 16,6\%$	<i>Variable</i>
Kosten Modul	ModCst	\$/W	0,96	<i>Ergebnis</i> ^f

^aVom 21.12.2011: Zeitpunkt mit immensen Preisdruck mit fast gar keiner Gewinnmarge, also Marktpreise gleich Kosten. Die Situation ist also mit heute (2014) vergleichbar.

^bcf. [13],

^cd. h.: Zellpreis minus Waferpreis in \$.

^dd. h.: Modulpreis minus Zellpreis in \$/W.

^ed. h.: Zellpreis in \$/wafer geteilt durch Zellpreis in \$/W.

^fVergleich mit Marktdaten von www.pvinsights.com [13] gibt konsistente Ergebnisse.

Tabelle 1.1: Simulationsparameter für Berechnung der Modulkosten nach Gl. (1.2).

Um die Modulkosten als Funktion des „Feedstock“-Preises und der Zelleffizienz η^{cell} zu berechnen, wird Gl. (1.2) mit den Parametern und Werten aus Tabelle 1.1 verwendet. Die Ergebnisse dieser Berechnung werden in Abb. 1.3 dargestellt.

$$\text{ModCst} = \frac{\text{WafrcSt} + \text{CellPrccSt} + \text{ModPrccSt} \times \text{PpCell}}{\text{PpCell} \times (\eta^{\text{cell}}/\eta_{\text{Ref}}^{\text{cell}})} \quad (1.2)$$

Es wird eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den so berechneten Modulkosten und den veröffentlichten Modulpreisdaten gefunden. Die Konsequenzen aus dieser Berechnung sind:

1. Die Modulkosten hängen linear vom „Feedstock“-Preis ab. Deshalb streben alle Hersteller danach, möglichst viel Material einzusparen. Das erklärt den Trend zu dünneren Wafern⁴.
2. Die Modulkosten hängen reziprok von der Zelleffizienz ab (vgl. weiße Linie in Abb. 1.3). Somit werden Hersteller mit Zelleffizienzen, die weit unterhalb der Referenz liegen, viel stärker bestraft, als man es in linearer Näherung erwarten würde.
3. Um die Referenzeffizienz herum gibt es einen näherungsweise linearen Bereich: Ein Senken der Modulkosten von 10 % übersetzt sich zu einer 10 % höheren Zelleffizienz oder zu einem 10 \$/kg billigeren „Feedstock“-Preis (vgl. weiße Beschriftungen und graue Pfeile in Abb. 1.3). Maßnahmen für eine höhere Effizienz erhöhen gleichzeitig die Produktionskosten, weil z. B. zusätzliche Prozessschritte hinzugefügt werden

⁴Die Kunst, dünnere Wafer einzusetzen, besteht in der Produktion darin, die Bruchrate stabil zu halten, d. h., weil dünnere Wafer zerbrechlicher sind als dicke, muss das ganze Transport- und Handlingssystem der Produktion angepasst werden, was nicht gerade billig ist.

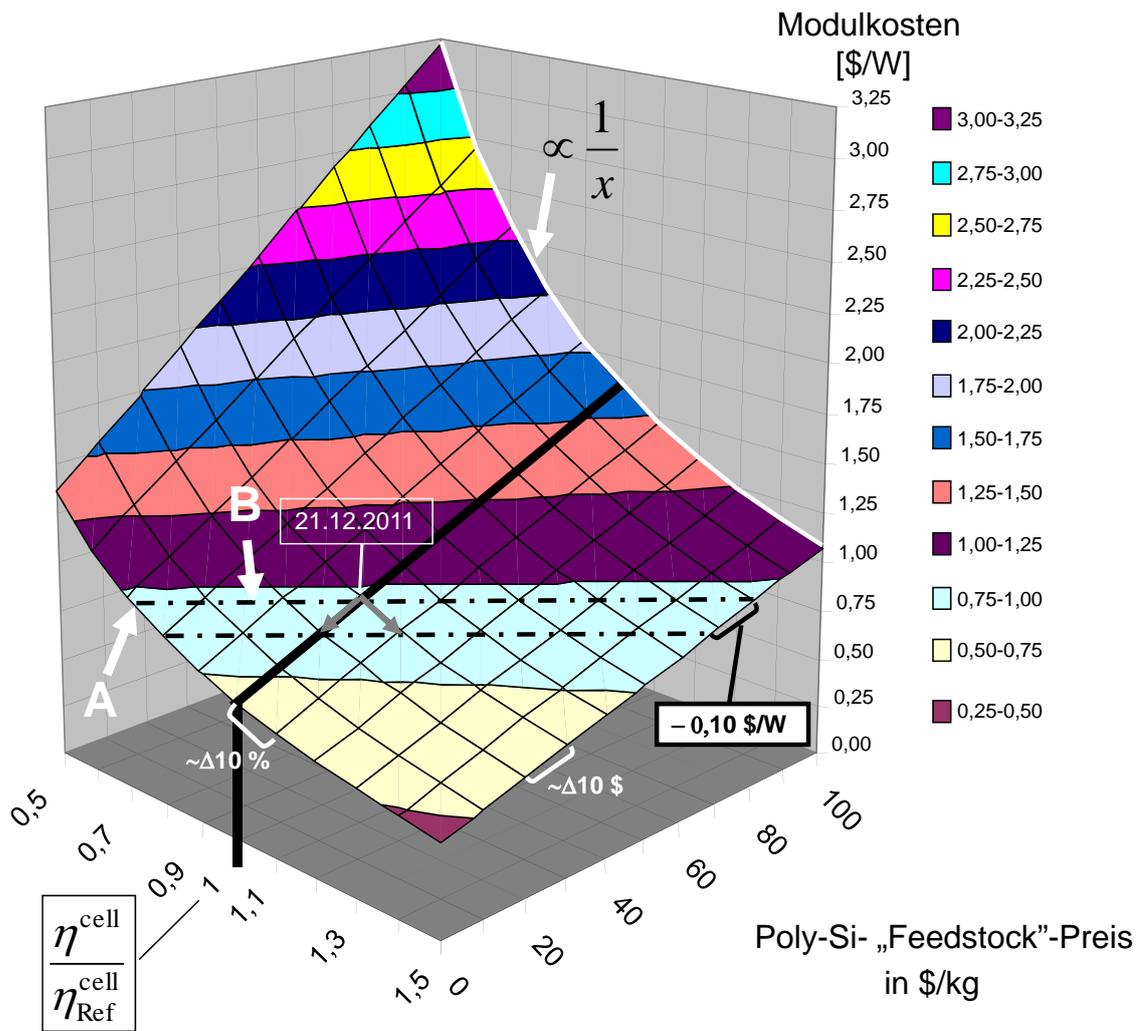


Abb. 1.3: Einfluss auf den Modulpreis von Zelleffizienz und „Feedstock“-Preis-Variationen bei konstant gehaltenen Produktionskosten. Zu den Details siehe Text und Tabelle 1.1.

müssen. Solche Maßnahmen zur Effizienzsteigerung lohnen sich nur, wenn sich die Modulkosten stärker senken lassen als die Maßnahmen kosten.

4. Billige „Feedstock“-Preise *und* höhere Zelleffizienzen sind notwendig für kleinere Modulkosten. Zur Illustration: Punkt A (0,715, 0\$/kg) in Abb. 1.3 repräsentiert das Niveau der Referenzkosten des Moduls. Dies entspricht einer Zelleffizienz von 11,9 %, was die minimale notwendige Effizienz für Zellen ist, welche keine „Feedstock“-Kosten haben. Für „upgraded metallurgical grade“ Silizium (umg-Si) mit angenommenen Kosten von ca. 15\$/kg (Punkt B in Abb. 1.3) beträgt diese Mindestzelleffizienz 14,3 % (bei einer Referenzeffizienz von 16,6 %).

Fazit: Eine Konsequenz hieraus sind folgende Trends in der Industrie: a) die Entwicklung von Zellkonzepten mit weniger Materialverbrauch, also dünneren Wafern, und b) Zellen mit höheren Wirkungsgraden. Letztere sind z. B. dünne multikristalline Zellen mit rückseitigem Passivierungsstacksystem und Punktkontakten, wie sie im Rahmen dieser Arbeit in Abschnitt 4.3 charakterisiert werden.

Von Modulkosten zu Kosten eines kompletten PV-Systems

Der Ausdruck „Balance of system“ oder BOS beschreibt alle weiteren Komponenten, welche bis auf die Module ein vollständiges PV-System ausmachen. BOS-Kosten lassen sich in flächenabhängige Kosten $BOS(A)$ (Halterungen, Verkabelung und Montagearbeit) und flächenunabhängige Kosten BOS (Wechselrichter, Planung) aufteilen. Im folgenden wird die Abhängigkeit der Kosten des gesamten PV-Systems von der Moduleffizienz diskutiert. Alle Angaben sind in Eurocent/W. Das Moduleffizienz-Benchmark-Verhältnis $\eta^{\text{mod}}/\eta_{\text{Ref}}^{\text{mod}}$ ist die Variable, welche die Moduleffizienz beinhaltet (vergleichbar mit $\eta^{\text{cell}}/\eta_{\text{Ref}}^{\text{cell}}$ im vorangegangenen Abschnitt). Die flächenabhängigen Kosten $BOS_{\text{Ref}}(A)$ und die flächenunabhängigen Kosten, die Modulkosten, Kosten des Systems und Gewinnmarge des Referenzsystems mit 15 %⁵ Moduleffizienz sind aus [15] entnommen. Mit verschiedenen Moduleffizienzen ändern sich die flächenabhängigen Kosten nach:

$$BOS \left(A, \frac{\eta^{\text{mod}}}{\eta_{\text{Ref}}^{\text{mod}}} \right) = \left(\frac{\eta^{\text{mod}}}{\eta_{\text{Ref}}^{\text{mod}}} \right)^{-2} \times BOS_{\text{Ref}}(A) \quad (1.3)$$

Ein Beispiel: Für Module mit der doppelten Effizienz als der Referenz ($\eta^{\text{mod}}/\eta_{\text{Ref}}^{\text{mod}} = 2$) sind das Hardwarematerial und die Arbeitszeit gleich wie bei der Referenz, aber die Kosten in Eurocent/W halbieren sich bezüglich $BOS_{\text{Ref}}(A)$. Diese Halbierung wird durch den ersten Faktor $\left(\frac{\eta^{\text{mod}}}{\eta_{\text{Ref}}^{\text{mod}}} \right)^{-1}$ in Gl. (1.3) beschrieben.

Der zweite Faktor $\left(\frac{\eta^{\text{mod}}}{\eta_{\text{Ref}}^{\text{mod}}} \right)^{-1}$ beschreibt dann lediglich die Änderungen der Modulfläche, welche für 1 W eines PV-Systems benötigt wird. Die Gleichung wird in Abb. 1.4 veranschaulicht. Das quadratische Verhalten der BOS-flächenabhängig ist deutlich zu erkennen. Die Gewinnmarge entlang der gesamten Wertschöpfungskette ist der Systempreis abzüglich aller Kosten wie dargestellt (weitere flächenunabhängige Kosten reduzieren die

⁵Der Unterschied zwischen Zell- und Moduleffizienz ist normalerweise um die 10 % und rührt von der zusätzlichen Modulfläche ohne Zellabdeckung her.

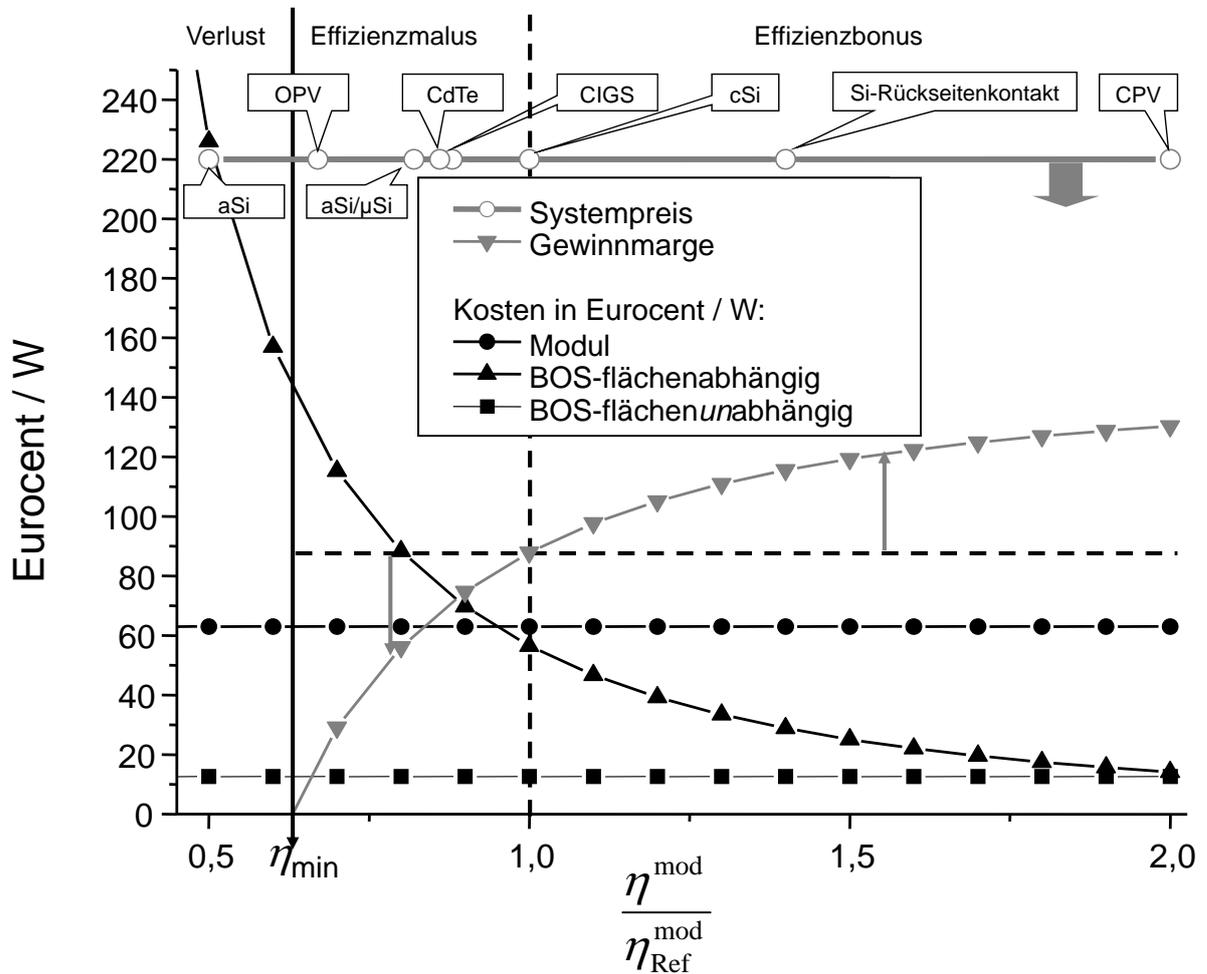


Abb. 1.4: Kostenbestandteile von PV-Systemen als Funktion der Moduleffizienz mit angenommenen konstanten Kosten für das Referenzsystem mit Si-Modulen mit 15% Wirkungsgrad [15]. Zum Vergleich Moduleffizienzen anderer Technologien oben: Amorphes Si (aSi) 7.4% [16], organische Photovoltaik (OPV) 9.8% (Rekord) [17], Tandemzellen aus amorphem Si und microkristallinem Si (aSi/ μ Si) 11.9% [18], Cadmiumtellurid (CdTe) 12.2% [19], Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS) 12.5% [20], Si Hocheffizienz mit Rückseitenkontakt 20.4% [21] und konzentrierte Photovoltaik (CPV) 30% [22].

Gewinnmarge um einen Offset) und hat somit auch eine quadratische Abhängigkeit. Bezüglich der Gewinnmarge gibt es drei Bereiche (Verlust, Effizienzmalus, Effizienzbonus) wie in Abb. 1.4 eingezeichnet. Die Bedeutung des quadratischen Verhaltens kann nicht überschätzt werden. Die zwei grauen Pfeile in Abb. 1.4 haben die gleiche Länge, repräsentieren also die gleichen Kosten, aber der Abstand zu der Referenzeffizienz des Moduls ist sehr verschieden. Dies bedeutet, dass ein Anstieg der Referenzeffizienz einen starken Druck auf *alle* Marktteilnehmer ausübt, ihre Effizienzen ebenfalls zu erhöhen, weil sie sonst sehr schnell über den Effizienzmalusbereich in den Verlustbereich zu rutschen drohen, in dem man unabhängig von der Moduleffizienz keine Solarmodule mehr verkaufen kann. Module aus dem Verlustbereich sind deshalb komplett unverkäuflich, weil es wirtschaftlich sinnvoller ist, stattdessen Module des Referenzsystems zu verwenden. Dies ist auch der Grund, warum alle Hersteller, besonders die anderer PV-Technologien als c-Si, versuchen, Demonstrationszellen mit sehr hohem Wirkungsgrad herzustellen: Man will (muss) den Kunden und auch Investoren zeigen, dass man auch in Zukunft noch wettbewerbsfähig ist. Auf der oberen Leiste in Abb. 1.3 sind einige PV-Technologien als Orientierung bezüglich ihrer Effizienz angegeben. Einige haben bereits ihre preisliche Wettbewerbsfähigkeit verloren, wie amorphes Silizium (aSi). Als Konsequenz hieraus setzen die aSi-Hersteller auf aSi/ μ Si-Tandemsolarzellenkonzepte, um einen höheren Wirkungsgrad zu erreichen, der nicht in der Verlustzone liegt. Eine Tandemsolarzelle besteht aus zwei Teilzellen, welche unterschiedliche Bereiche des Sonnenspektrums absorbieren und somit das Sonnenspektrum besser ausnutzen können als die Einzelzelle. Im Rahmen dieser Arbeit werden in Abschnitt 4.4 aSi/ μ Si-Tandemsolarzellen charakterisiert.

Fazit: Module müssen beides sein: ausreichend preiswert *und* ausreichend effizient. Selbst wenn die Modulproduktion nichts kostet, muss ein Mindestwirkungsgrad erreicht werden, um die Module noch verkaufen zu können.

1.2.2 Einfluss der Haltbarkeit

Gleichung für die PV-Stromkosten Die PV-Stromkosten E_{cost} in \$/kWh oder €/kWh werden durch folgende Gleichung beschrieben:

$$E_{\text{cost}} = \frac{\sum \text{cost}}{\sum E_{\text{harvest}}} = \frac{\sum \text{cost}}{A_{\text{System}}^{\text{active}} \times \langle \text{Rad} \rangle \times \langle \eta^{\text{System}} \rangle \times \text{YoO} \times (1 - 0.5 \times \text{YoO} \times \text{ADR})} \quad (1.4)$$

Hierbei sind $\sum \text{cost}$ in \$ oder € die gesamten Bau- und Betriebskosten des PV-Systems, $\sum E_{\text{harvest}}$ in kWh die Elektrizitätsmenge, welche während der Gesamtlebensdauer des Systems produziert wird, $A_{\text{System}}^{\text{active}}$ in m^2 ist die Gesamtfläche der Module, $\langle \text{Rad} \rangle$ in $\text{kWh m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ist die durchschnittliche jährliche Sonnenstrahlungsenergie, $\langle \eta^{\text{System}} \rangle$ (keine Einheit) ist der durchschnittliche Wirkungsgrad des PV-Systems unter Arbeitsbedingungen⁶, YoO in a ist die Gesamtzahl an Operationsjahren des PV-Systems und ADR in a^{-1} ist die jährliche Degradationsrate der Systemeffizienz.

Die Faktoren von Gl. (1.4) hängen hauptsächlich von drei Randbedingungen ab:

⁶Dieser Faktor ist der Wirkungsgrad des PV-Systems korrigiert um lokale Einflüsse wie Temperatur, Eintrittswinkel, tägliche Verschiebung des Solarenspektrums, etc..

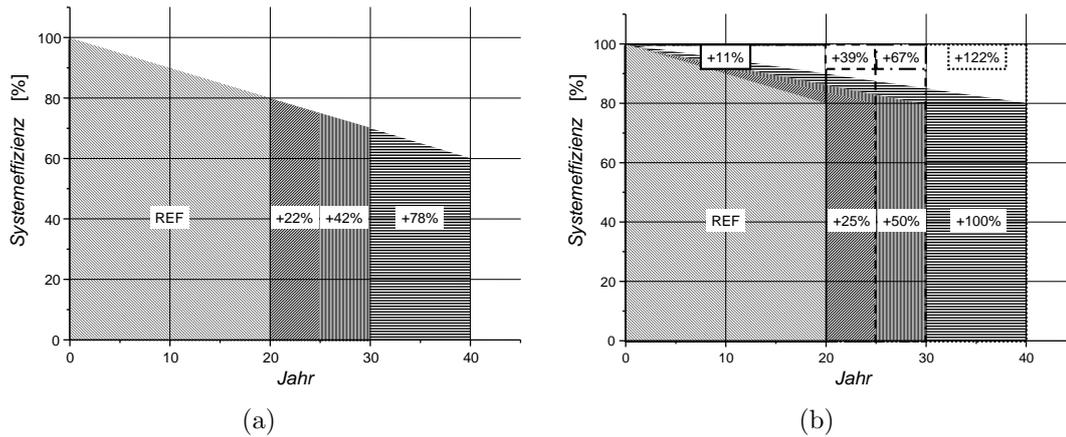


Abb. 1.5: Verschiedene Szenarien für die Entwicklung der Systemeffizienz. a) Verlängerung der Haltbarkeit (YoO), b) Verlängerung der Haltbarkeit (YoO) und Verringerung der jährlichen Degradationsrate (ADR). Das Referenzsystem (REF) hält genau 20 Jahre und verschlechtert sich mit 1 %/Jahr. Die weißen Boxen kennzeichnen den Mehrertrag bezüglich des Referenzsystems (bei b) an der Oberkante für den Fall, dass keine Degradation auftritt.

1. *vom Menschen:* Lokale Kosten (Systemkauf und Installation), Kapitalkosten (Zinsen und Inflationsraten), Risikoprämien (z. B. Gesetzesvorschriften, Steuern, etc.) und Gewinnmargen.
2. *Physik des Standorts:* Lokale Einstrahlung (Intensität, Spektrum, „air mass“), Temperatur (Wind für die Kühlung), Systemausrichtung und Abschattungsbedingungen.
3. *PV-System:* Systemeffizienz, Lebensdauer des Systems, jährliche Degradationsrate.

Abb. 1.5 verdeutlicht den Einfluss des PV-Systems auf die gesamte geerntete Energie nach Gl. (1.4). Die Auftragungen zeigen eine lineare Abnahme der anfänglichen Systemeffizienz für Systeme mit einer unterschiedlichen Haltbarkeit (YoO: 20 a, 25 a, 30 a, 40 a). Das Referenzsystem (REF) repräsentiert den derzeitigen Industriestandard. In Abb. 1.5 a) ist $ADR = 0.01 \text{ a}^{-1}$ für alle vier Systeme angenommen. Der zusätzliche Energieertrag bezüglich des Referenzsystems ist für die unterschiedliche Haltbarkeit in den weißen Boxen angegeben. In Abb. 1.5 b) ist die jährliche Degradationsrate variiert bis nach der Lebensdauer des Systems 80 % Systemeffizienz verbleibt, d. h. $ADR: 0.01 \text{ a}^{-1}, 0.008 \text{ a}^{-1}, 0.0066 \text{ a}^{-1}, 0.005 \text{ a}^{-1}$. Die weißen Boxen mit verschiedenen gestrichelten Linien am oberen Bildrand zeigen die zusätzlich geerntete Energie in Bezug zum Referenzsystem für den perfekten Fall mit keiner Degradation, d. h. $ADR = 0 \text{ a}^{-1}$.

Man sieht, dass Maßnahmen, welche die YoO erhöhen und die ADR von Modulen verringern, einen sehr großen Einfluss auf die finalen PV-Stromkosten haben. Im Rahmen dieser Arbeit werden in Abschnitt 4.5 Minimodule auf ihr Degradationsverhalten durch potentialinduzierte Degradation (PID) hin untersucht.

1.2.3 Konsequenzen für Charakterisierungstechniken

Da Zelleffizienz und -haltbarkeit den PV-Strompreis und somit den möglichen Zellpreis wesentlich beeinflussen, ist es für die Hersteller von enormer Bedeutung, beides messen und somit verbessern zu können. Besonders für Zellhersteller mit multikristallinem Si-Material ist es wichtig, zwischen material- oder prozessinduzierten Verlusten unterscheiden zu können, um zielgerichteter die Zelleffizienz steigern zu können. Hierfür eignen sich besonders gut lokale Charakterisierungstechniken wie CELLO.

Da der Zellwirkungsgrad von sehr vielen lokalen Material- und Prozessparametern abhängt, ist es meistens nicht möglich (oder zu aufwendig), die limitierenden Prozesse durch integrale globale Inline-Messungen (Messzeit innerhalb 1 s) zu identifizieren. Vielmehr ist eine langsamere dafür aber viel genauere orts aufgelöste Messung sinnvoll, die viele unterschiedliche material- und prozessinduzierte Eigenschaften messen kann, was im Rahmen dieser Arbeit gezeigt wird.

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen

2.1 Analyse integraler Kennliniendaten

Für die Analyse integraler Kennliniendaten von Solarzellen wird in erster einfacher Näherung oft das in Abb. 2.1 a) und Gl. (2.1) dargestellte einfache Ein-Dioden-Modell verwendet. Durch Beleuchtung wird der Photostrom I_{PH} generiert, welcher entweder über den globalen Serienwiderstand R_{SER} ausgekoppelt wird oder über die Diode oder den Parallelwiderstand R_{P} – auch als Shuntwiderstand bezeichnet – kurzgeschlossen wird [23, 24]. I_{01} bezeichnet dabei den Sättigungsstrom der Diode.

Das in Abb. 2.1 b) und Gl. (2.2) dargestellte Zwei-Dioden-Modell berücksichtigt zusätzlich die Generations- und Rekombinationsströme aus der Raumladungszone und eignet sich besonders gut für kristalline Si-Solarzellen. Dabei ist n der Nichtidealitätsfaktor der zweiten Diode, welcher häufig den Wert 2 besitzt, und I_{02} der Sättigungsstrom der zweiten Diode.

$$I = I_{\text{PH}} - I_{01} \left\{ \exp \left(\frac{U + IR_{\text{SER}}}{kT} \right) - 1 \right\} - \frac{U + IR_{\text{SER}}}{R_{\text{P}}} \quad (2.1)$$

$$I = I_{\text{PH}} - I_{01} \left\{ \exp \left(\frac{U + IR_{\text{SER}}}{kT} \right) - 1 \right\} - I_{02} \left\{ \exp \left(\frac{U + IR_{\text{SER}}}{nkT} \right) - 1 \right\} - \frac{U + IR_{\text{SER}}}{R_{\text{P}}} \quad (2.2)$$

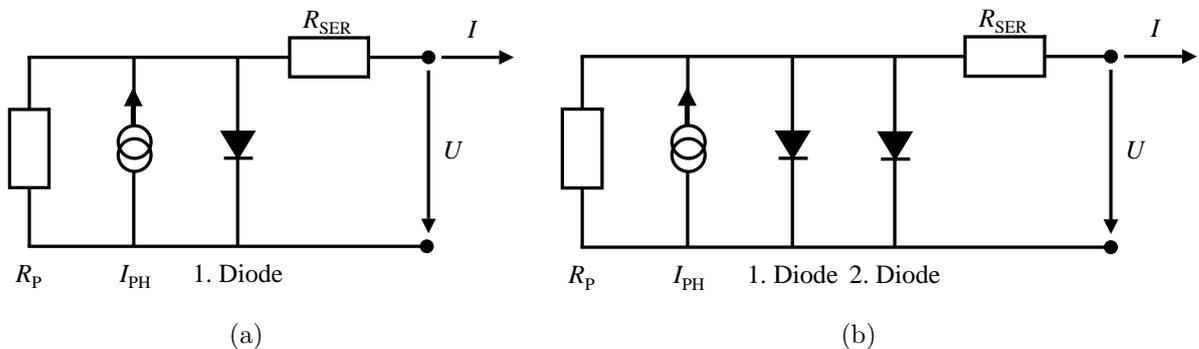


Abb. 2.1: a) Ersatzschaltbild des Ein-Dioden-Modells; b) Ersatzschaltbild des Zwei-Diodenmodells.

Nebenbemerkung: Ziel der meisten lokalen Charakterisierungstechniken ist es, orts aufgelöste Bilder der Parameter des jeweiligen Ersatzschaltbilds zu erzeugen. Die nachfolgend bis Abschnitt 2.6 vorgestellten Analyse- und Auswertetechniken sind (viel) anspruchsvoller als die einfache integrale Kennlinienmessung.

2.2 Analyse des Serienwiderstands

In diesem Abschnitt wird kurz die Prozedur zur Extraktion von orts aufgelösten Serienwiderstandsdaten $R_{\text{SER}}(x, y)$ aus orts aufgelösten Spannungsbildern beschrieben, wie sie bei CELLO- und bei Photolumineszenzmessungen verwendet wird [25, 26]. Dafür werden im Fall von CELLO-Messungen orts aufgelöste Spannungsbilder (dU_{OC}), Strombilder (dI_{SC}) und die globalen Kennliniendaten benötigt (Details zur Messung der orts aufgelösten CELLO-Daten werden später im Abschnitt 3.1 und im Abschnitt 3.3.1 vorgestellt). Zuerst wird das Verhältnis von dU_{OC} zu dI_{SC} gebildet, welches die Einheit Ohm besitzt und deshalb auch R -Bild genannt wird. Dann wird das Histogramm $H(R)$ des R -Bilds verwendet, um die R -Verteilung über der relativen Zellfläche a als $R(a)$ aufzutragen, indem

$$N(R) := \int_{R_{\min}}^R H(R') dR' \quad (2.3)$$

berechnet wird, wobei $N(R)$ die Anzahl an Pixeln des Bildes mit Werten $\leq R$ beschreibt und $N(R_{\max})$ die Gesamtpixelanzahl, wodurch $a(R) := N(R)/N(R_{\max})$ definiert werden kann als relative Fläche der Solarzelle mit Werten $\leq R$. Die inverse Funktion $R(a)$ gibt die Verteilung der R -Werte über die Solarzellenfläche an. Schematisch ist diese in Abb. 2.2 dargestellt. Gezeigt ist das lineare Verhalten, welches sich unter ziemlich allgemeinen Voraussetzungen herleiten lässt ([27, 26]) und das bei der Auswertung der meisten Solarzellen über den größten Anteil der Zellfläche zu beobachten ist¹. Linearisiert (dies ist bei CELLO-Messungen möglich, weil es sich um eine Kleinsignalanalyse handelt) und unter Vernachlässigung des Shuntwiderstandes lassen sich die Ersatzschaltbilder aus Abb. 2.1 zu dem Ersatzschaltbild in Abb. 2.3 vereinfachen. Der gesamte Solarzellenwiderstand R_{SC} (d. h. der differentielle Widerstand der globalen I - V -Kennlinie an dem Arbeitspunkt, der für die Kleinsignalmessung verwendet wird) ist dann lediglich die Summe aus dem globalen Serienwiderstand R_{SER} und dem globalen Diodenwiderstand R_{D} : $R_{\text{SC}} = R_{\text{SER}} + R_{\text{D}}$. Diese Beziehung ist für die folgende Bestimmung des *lokalen* Serienwiderstandes wichtig: Im in [27] hergeleiteten analytischen Modell entspricht der Mittelwert von $R(a)$ dem globalen R_{D} -Wert, $\langle R(a) \rangle = R_{\text{D}}$, und dem Maximum der R -Werte entspricht R_{SC} . Entsprechend dem Ersatzschaltbild in Abb. 2.3 gilt $R_{\text{SER}} = R_{\text{SC}} - R_{\text{D}}$, und daraus abgeleitet eine flächenabhängige Serienwiderstandsfunktion $R_{\text{SER}}(a) := R_{\max} - R(a)$. Diese Definition hat zwei Konsequenzen: i.) weil $R(a)$ eine lineare Verteilung ist, ist auch $R_{\text{SER}}(a)$ eine lineare Verteilung, was sinnvolle Mittlungen über die Fläche der Solarzelle von $R_{\text{SER}}(a)$ ermöglicht; ii.) der arithmetische Mittelwert von $R_{\text{SER}}(a)$ erfüllt genau die Verhältnisse des Ersatzschaltbilds der linearen Antwort in Abb. 2.3:

$$\langle R_{\text{SER}}(a) \rangle = \langle R_{\max} - R(a) \rangle = R_{\max} - \langle R(a) \rangle = R_{\text{SC}} - R_{\text{D}} = R_{\text{SER}}. \quad (2.4)$$

¹Extrem schlechte Solarzellen, welche nicht mehr ökonomisch sinnvoll sind (siehe [26]), zeigen Verteilungen mit mehreren linearen Bereichen oder ohne lineares Verhalten.

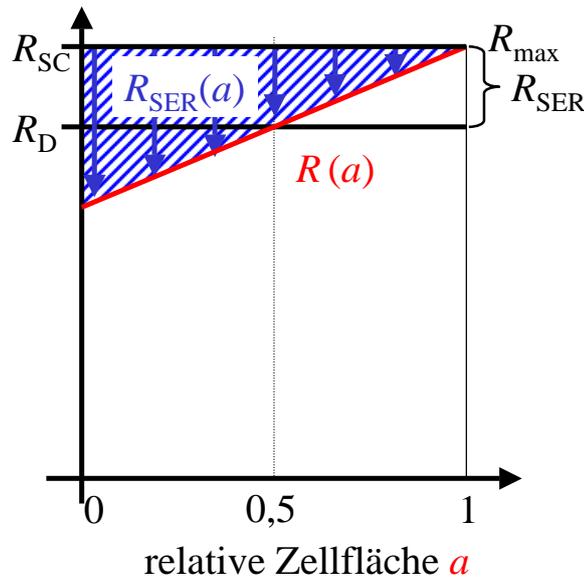


Abb. 2.2: Schema zur Bestimmung des Serienwiderstands.

Zuletzt werden analog zu $R_{\text{SER}}(a)$ die lokalen Werte des Serienwiderstands berechnet nach:

$$R_{\text{SER}}(x, y) = R_{\text{max}} - R(x, y) \quad (2.5)$$

Aus diesem R_{SER} -Modell bei linearer Antwort ergeben sich noch weitreichende Konsequenzen für die Abhängigkeit des Serienwiderstands vom Injektionsniveau (oder auch der angelegten Spannung U):

$$\frac{1}{R_{\text{SER}}(U)} = \frac{1}{R_{\text{SER}}^{\infty}} + \frac{1}{R_{\text{D}}(U)}, \quad (2.6)$$

wobei R_{SER}^{∞} den Serienwiderstand bei unendlich großem Diodenwiderstand beschreibt. Gleichung (2.6) berücksichtigt, dass der in der Fläche verteilte Anteil des Serienwiderstands abhängig vom Diodenwiderstand ist und somit mit der an der Diode anliegenden Spannung variiert.

2.3 Analyse des Photostroms: Photoimpedanz

Abbildung 2.4 zeigt die Generationsrate von Elektron-Loch-Paaren $G(x)$ in Abhängigkeit der Zelltiefe x für verschiedene Eindringtiefen (bei verschiedenen Lichtwellenlängen). Sie berechnet sich nach Gl. (2.7) mit $\alpha(\lambda)$ als Absorptionskoeffizienten, $F(\lambda)$ als Anzahl einfallender Photonen pro Fläche und Zeit und pro Einheit der Bandbreite und $R_{\text{reflect}}^{\text{front}}(\lambda)$ als Anteil dieser Photonen, welcher von der Oberfläche reflektiert wird:

$$G(\lambda, x) = \alpha(\lambda)F(\lambda) [1 - R_{\text{reflect}}^{\text{front}}(\lambda)] e^{-\alpha x} \quad (2.7)$$

In Abb. 2.5 ist dazu schematisch der Aufbau des p-n-Übergangs einer Solarzelle abgebildet, der sich in den n-dotierten Emittor, die Raumladungszone (RLZ) mit der Weite W

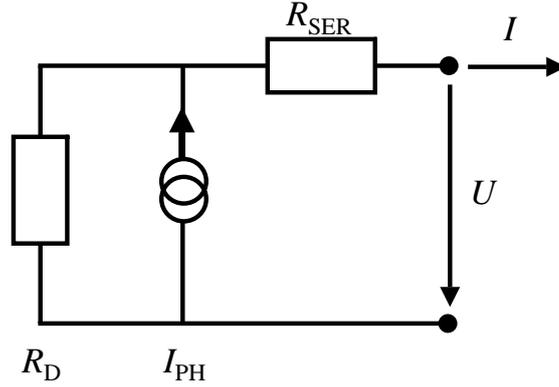


Abb. 2.3: Vereinfachtes linearisiertes Ersatzschaltbild zur Serienwiderstandsbestimmung.

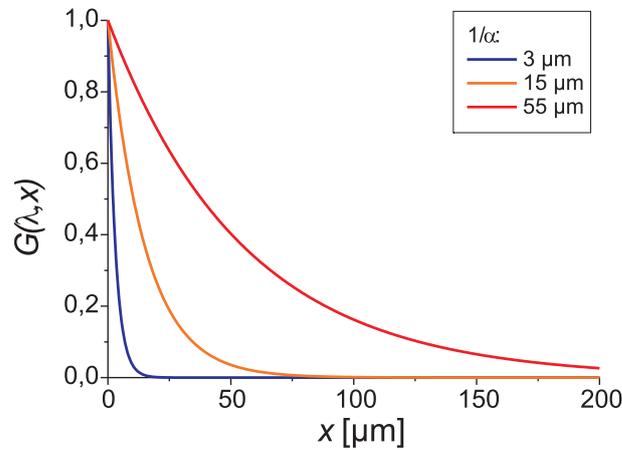


Abb. 2.4: Generationsrate als Funktion der Si-Dicke x bei verschiedenen Eindringtiefen $1/\alpha$ (d. h. unterschiedlichen Lichtwellenlängen).

und die p-dotierte Basis aufteilt. Mit der Annahme einer homogenen Lebensdauer, einer homogenen Mobilität und einem homogenen Dotierniveau unter Bedingung der Niedriginjektion berechnet sich der an der Kante der Raumladungszone eingesammelte Strom der p-dotierten Basis (unter Kurzschlussbedingung) nach der Lösung der Diffusionsgleichung [24]:

$$J_n = \frac{qF(1 - R_{\text{reflect}}^{\text{front}}(\lambda))\alpha L}{\alpha^2 L^2 - 1} e^{-\alpha(x_j + W)} \times \left\{ \alpha L - \frac{S_b L}{D} \left[\cosh\left(\frac{H'}{L}\right) - e^{-\alpha H'} \right] + \sinh\left(\frac{H'}{L}\right) + \alpha L e^{-\alpha H'} \right\} \quad (2.8)$$

$$\times \left\{ \frac{S_b L \sinh\left(\frac{H'}{L}\right) + \cosh\left(\frac{H'}{L}\right)}{D} \right\}$$

Dabei ist S_b die Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit an der Zellrückseite in cm/s und D die Diffusionskonstante in cm^2/s . Die Normierung der Summe aller Ströme, also auch den der Raumladungszone und des Emitters, auf $qF(1 - R_{\text{reflect}}^{\text{front}}(\lambda))$ ergibt die interne „Spectral Response“ SR. Eine SR für eine typische Solarzelle ist in Abb. 2.6 dargestellt [24]. In dem Bild sind die Teilströme aus Basis, Raumladungszone und Emitter ebenso eingezeichnet wie die Wellenlängen der von CELLO verwendeten Laser. Die Laser, welche bei

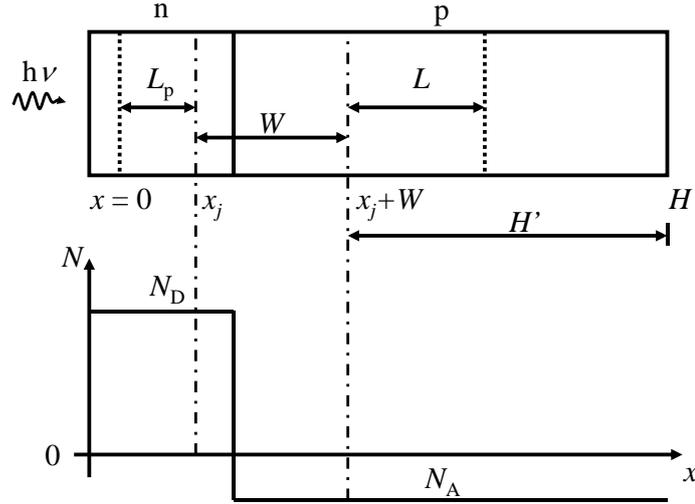


Abb. 2.5: Vereinfachtes Schema einer Solarzelle mit n-dotiertem Emitter, der Raumladungszone (RLZ) mit Weite W und p-dotierter Basis.

der Photoimpedanzmessung verwendet werden (RED, IR und SIR) werden hauptsächlich in der Basis absorbiert und tragen dort zum (Minoritäts-) Photostrom bei.

Bei der CELLO-Photoimpedanzanalyse werden die Amplitude und die Phasenverschiebung als komplexe Impedanz Z ausgedrückt. Sie ist das Produkt von drei unabhängigen Impedanzen [28]: Z_{Sys} = die (gedämpfte) Resonanzkomponente des Messsystems, Z_{RC} = die RC -Komponente der Solarzelle und Z_{SC} = die zeitabhängige Lösung der Diffusionsgleichung (siehe Gl. (2.8)) für Solarzellen. Z_{RC} ist ausreichend durch einen Relaxationsansatz beschrieben:

$$Z_{\text{RC}} = \frac{1}{1 + i\omega RC}, \quad (2.9)$$

mit RC als Tiefpasszeitkonstante aufgrund von RC -Gliedern zwischen Beleuchtungspunkt und Referenzelektrode. Die Lösung Z_{SC} der Diffusionsgleichung ist gegeben durch [28, 29, 30]:

$$Z_{\text{SC}}(\tau, D, S_b, R_{\text{reflect}}^{\text{front}}(\lambda), \alpha, d_W, \omega) = qF(1 - R_{\text{reflect}}^{\text{front}}(\lambda)) \times \frac{1}{1 - \left(\frac{G}{\alpha}\right)^2} \frac{\frac{G}{\alpha} \left(1 - \frac{S_b}{D\alpha}\right) - \tanh(d_W G) \left[\left(\frac{G}{\alpha}\right)^2 - \frac{S_b}{D\alpha}\right]}{\frac{G}{\alpha} + \tanh(d_W G) \frac{S_b}{D\alpha}}$$

$$\text{mit } G = \sqrt{\frac{1}{L^2} + \frac{i\omega}{D}}$$

$$\text{und } L = \sqrt{D\tau}.$$
(2.10)

Dabei bezeichnet d_W die Dicke der Solarzelle in μm .

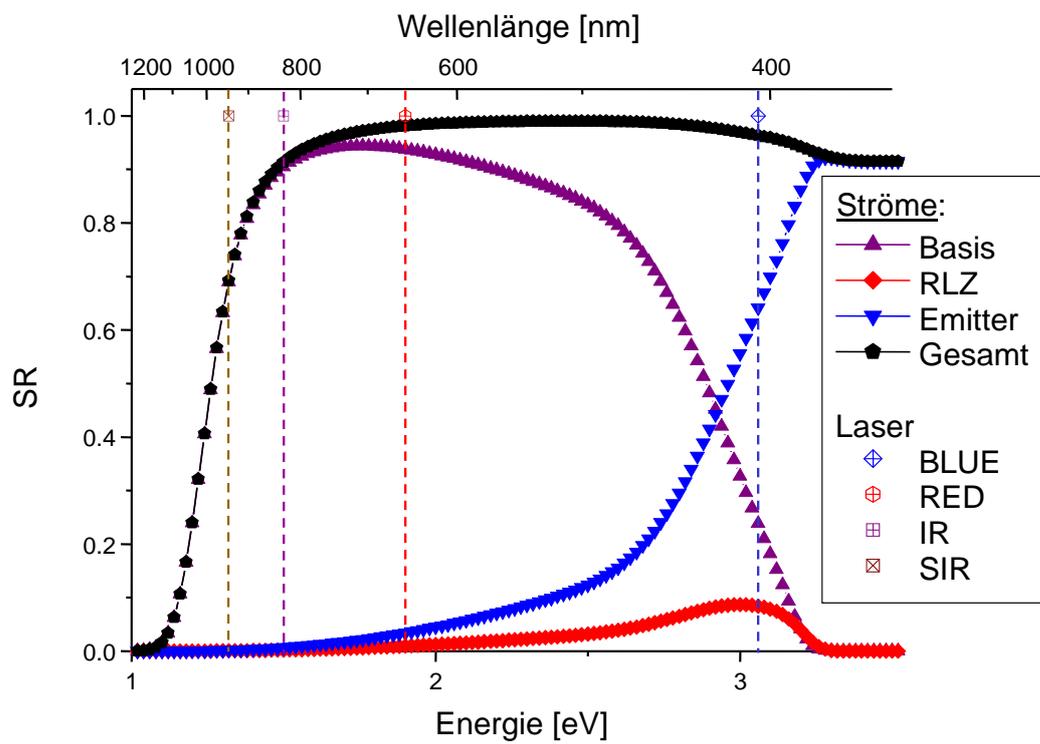


Abb. 2.6: „Spectral Response“ einer konventionellen Si-Solarzelle. Während der blaue CELLO-Laser sensitiv auf den Emitter ist, sind die restlichen Laser sensitiv auf die Basis. Eigene Simulation mit Formel und Zellenparametern aus [24].

2.3.1 Einfluss angelegter mechanischer Spannung

Durch Verwendung der Lösung der Standarddiffusionsgleichung [24] lassen sich leicht die Kurzschlussströme für Licht mit bestimmter Wellenlänge λ berechnen. Wie z. B. in [31, 32] diskutiert, kann die lineare Antwort der modulierten Laserintensität leicht durch die Einführung einer frequenzabhängigen Diffusionslänge

$$\frac{1}{L(\omega)} = \frac{1}{\sqrt{D}} \sqrt{\frac{1}{\tau} + i\omega} \quad (2.11)$$

in die statische Lösung Gl. (2.8) berücksichtigt werden: Für $\omega \rightarrow 0$ vereinfacht sich Gl. (2.11) zum wohlbekanntem Term $L = \sqrt{D\tau}$. Hierbei ist D der Diffusionskoeffizient, welcher durch die Einsteinbeziehung $D = \mu kT/e$ zu der Mobilität μ der Minoritäten in Beziehung steht, und τ ist die Volumen-Lebensdauer; weitere Parameter, welche bekannt sein müssen, sind die Rückseitenrekombinationsgeschwindigkeit S_b , die wellenlängenabhängige Eindringtiefe von Licht in Si $d(\lambda)$, das Reflexionsvermögen und die Zelldicke d_w . Für die Analyse der CELLO-Messungen sind die Ergebnisse in Abhängigkeit der Kreisfrequenz aus zwei Gründen wesentlich:

- Um das Signal-zu-Rauschverhältnis zu verbessern, werden CELLO Messungen als Lock-in Messungen der sinusförmig modulierten Laserstrahlintensität durchgeführt.
- Für Solarzellen mit einer großen Diffusionslänge L ist es fast unmöglich, D und τ nur aus der statischen Lösung voneinander zu separieren.

Bei der Modulation der Intensität wird zum größten Teil zusätzliche Information aus der Phasenverschiebung

$$\varphi(\omega) = \omega \Delta t(\omega) \quad (2.12)$$

extrahiert, wobei $\Delta t(\omega)$ alle Zeitversätze zwischen dem Intensitätssignal des Lichts und dem Kurzschlussstrom zusammenfasst, z. B. Volumen-Lebensdauer τ , RC Zeitkonstante und der Zeitversatz der Diffusion zwischen Generation und Erreichen des p-n-Übergangs

$$\Delta t_{\text{Diffusion}} \approx \frac{d(\lambda)}{\nu} \propto \frac{d(\lambda)}{\mu}, \quad (2.13)$$

wobei ν die durchschnittliche Geschwindigkeit der Minoritätsladungsträger ist. Gleichung (2.13) fasst die Parameterabhängigkeit der Phasenverschiebung halbquantitativ zusammen; mit einer großen Eindringtiefe des Lichts werden $\Delta t_{\text{Diffusion}}$ und somit die Phasenverschiebung groß. Ist die Mobilität hoch, so werden $\Delta t_{\text{Diffusion}}$ und die Phasenverschiebung kleiner; die Änderung für verschiedene Lichtwellenlängen skaliert ungefähr mit der Eindringtiefe des Lichts.

Zur Analyse von Effekten durch mechanische Spannung sollte natürlich die wohlbekannte Abhängigkeit der Mobilität von mechanischer Spannung [33] mitberücksichtigt werden. Es ist wohlbekannt, dass sich E_g ändert, wenn mechanische Spannung angelegt wird, d. h. wenn sich die Gitterkonstante der Gitter im elastischen Bereich ändert. Dieser zweiter Effekt in Bezug auf die wellenlängenabhängige Eindringtiefe von Licht ist auch in der Literatur beschrieben [34, 35]:

$$\alpha(\lambda) = \frac{1}{d(\lambda)} = \frac{A}{1 - \exp\left(\frac{-E_{\text{ph}}}{kT}\right)} \left[\frac{hc}{\lambda} - E_g - E_{\text{ph}} \right]^2 + \frac{A}{\exp\left(\frac{-E_{\text{ph}}}{kT}\right) - 1} \left[\frac{hc}{\lambda} - E_g + E_{\text{ph}} \right]^2 \quad (2.14)$$

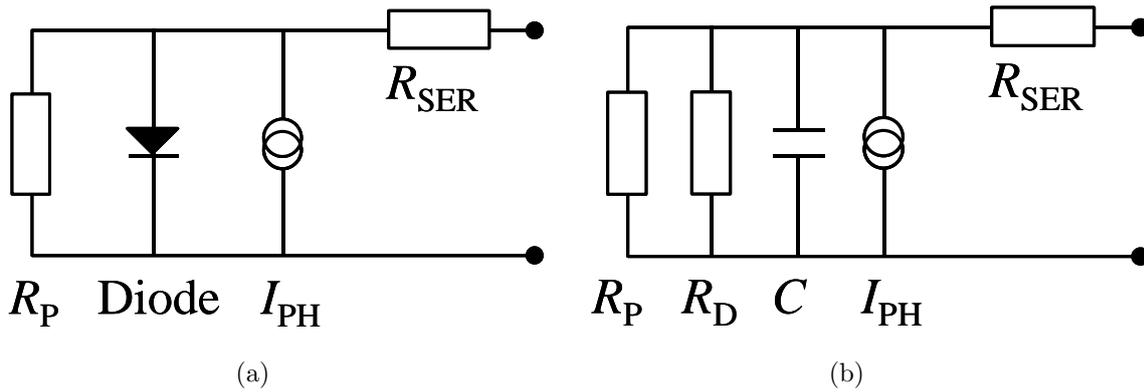


Abb. 2.7: Ersatzschaltbilder für Solarzellen: a) Allgemeines Ein-Dioden-Modell für große Signale; b) entsprechende Linearisierung für die Analyse der Kleinsignalantwort.

Hierbei wird hc/λ für die Energie des Lichts genommen; E_{ph} ist die (durchschnittliche) Energie der durch Licht generierten Elektron-Loch-Paare im Material mit indirekter Bandlücke; E_g ist die Bandlücke und A ist eine Konstante, welche typischerweise aus einem Fit an gemessene $\alpha(\lambda)$ -Kurven extrahiert wird. Eine Änderung in E_g wird zu einer Änderung der Eindringtiefe $d(\lambda)$ nach Gl. (2.14) führen. Für eine Wellenlänge nahe an der Absorptionskante von Silizium kann dies zu Änderungen von mehr als einer Größenordnung führen, während z. B. für rotes, sichtbares Licht die Spannungsabhängigkeit komplett vernachlässigbar ist, sodass dies zu einer nicht linearabhängigen Änderung der Phasenverschiebung des Kurzschlussstromes führt. Dies ist im starken Gegensatz zu spannungsinduzierten Effekten der Mobilität, welche wie oben erwähnt eine nahezu lineare Änderung der Phasenverschiebung nach der Eindringtiefe aufweisen.

Durch die Einführung von E_g als zusätzlichen Fitparameter können jetzt auch spannungsabhängige Änderungen der Eindringtiefe für alle Wellenlängen des Lichts berechnet werden. Der Einbau dieser Eindringtiefen in die Fitauswertungsprozedur für Kurzschlussströme (Amplitude und Phasenverschiebung), wie z. B. im Detail in [31, 32] beschrieben, ermöglicht zusätzlich die Analyse lokaler Effekte induziert durch mechanische Spannung.

2.3.2 Messung von Inhomogenitäten in $R_{SER}C$

Abbildung 2.7 a) zeigt das Standard-Ersatzschaltbild einer Solarzelle mit dem Serienwiderstand R_{SER} , Parallelwiderstand R_P , Photostromquelle I_{PH} und die Diode, welche den p-n-Übergang repräsentiert. Für die Messung der linearen Kleinsignalantwort als Reaktion auf ein modulierte Störsignal mit der Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ muss die Frequenzabhängigkeit mit berücksichtigt werden, wie in [36] diskutiert, mit dem Ersatzschaltbild in Abb. 2.7 b). Für Kurzschlussbedingungen ist R_D (der differentielle Widerstand der Diode, welcher bei der Kleinsignalanalyse die Diode beschreibt) sehr groß und kann vernachlässigt werden. R_P kann in den meisten Fällen auch vernachlässigt werden, da die meisten (Industrie-) Solarzellen keine wesentlichen ohmschen Shunts mehr besitzen.

Deshalb ist die Frequenzabhängigkeit des Kurzschlussantwortsignals, von CELLO gemessen als Amplitude $A_{x,y}$ und Phasenverschiebung $\varphi_{x,y}$, hauptsächlich gegeben durch

einen parallel geschalteten Widerstand und einen Kondensator:

$$A_{x,y} \exp(i\varphi_{x,y}) = \frac{1}{1 + i\omega R_{\text{SER}}C} + \dots \quad (2.15)$$

Für kleine Phasenverschiebungen φ reduziert sich dies zu

$$\varphi(\omega) \approx \tan(\varphi) = -\omega R_{\text{SER}}C + \text{const.} \quad (2.16)$$

Dabei bezieht sich const. auf zusätzliche Phasenverschiebungen, die in Bezug zu anderen Transportprozessen in der Solarzelle stehen, die typischerweise eine schwächere Frequenzabhängigkeit aufweisen, z. B. Diffusion der Minoritätsladungsträger. Für lokale Photostrome, gemessen bei verschiedenen Frequenzen $\omega_1 \gg \omega_2$, kann in guter Näherung die $R_{\text{SER}}C$ -Zeitkonstante von den anderen Zeitkonstanten separiert werden, indem

$$\varphi(\omega_1) - \varphi(\omega_2) = (\omega_1 - \omega_2)(R_{\text{SER}}C)_{x,y} \quad (2.17)$$

berechnet wird. Da $(\omega_1 - \omega_2)$ nur ein konstanter Skalenfaktor ist, ist Gl. (2.17) eine sehr praktische Methode, um lokale Inhomogenitäten in $R_{\text{SER}}C$ darzustellen. So kann die lokale Änderung von $R_{\text{SER}}C$, z. B. wenn die globale Beleuchtung geändert wird, einfach analysiert werden durch

$$(\omega_1 - \omega_2) [R_{\text{SER}}C_{x,y}^{\text{beleuchtet}} - R_{\text{SER}}C_{x,y}^{\text{dunkel}}] = (\omega_1 - \omega_2) \Delta(R_{\text{SER}}C)_{x,y} \quad (2.18)$$

Demgegenüber eliminiert die Berechnung des Phasenbilds nach

$$\Delta\tau_{x,y} = \frac{\varphi(\omega_1)}{\omega_1} - \frac{\varphi(\omega_2)}{\omega_2} \quad (2.19)$$

alle Phasenverschiebungen mit einer linearen Frequenzabhängigkeit, es wird also ein Bild ohne $R_{\text{SER}}C$ -Effekte erstellt („frequency-corrected“ im Laborslang).

2.4 Analyse von Messungen der zweiten Harmonischen

Für jede Antwort des Photostroms einer Solarzelle auf (lokale) Beleuchtung mit Intensität I kann die mögliche Modulation der Intensität mit (Kreis-)Frequenz $\omega = 2\pi f$ durch Licht mit der Wellenlänge λ als Taylor-Reihe dargestellt werden als

$$F(I, \omega, \lambda) = c_0(I_0, \omega, \lambda) + c_1(I_0, \omega, \lambda)(I - I_0) + c_2(I_0, \omega, \lambda)(I - I_0)^2 + \dots \quad (2.20)$$

Für die Anwendung von zwei periodisch modulierten Signalen zweier Laser a und b mit unterschiedlichen Wellenlängen gilt:

$$(I - I_0) = I_a \cos(\omega_a t) + I_b \cos(\omega_b t), \quad (2.21)$$

was nach Gl. (2.20) zu einer linearen Antwort führt von

$$F_1(I, \omega, \lambda) = c_1(I_0, \omega_a, \lambda_a) I_a \cos(\omega_a t) + c_1(I_0, \omega_b, \lambda_b) I_b \cos(\omega_b t). \quad (2.22)$$

Die Antwort in zweiter Ordnung enthält drei Komponenten mit verschiedenen Frequenzen:

$$F_{2,1}(I, \omega, \lambda) = c_2(I_0, \omega_a, \lambda_a) I_a^2 \frac{\cos(2\omega_a t + 1)}{2} \quad (2.23)$$

$$F_{2,2}(I, \omega, \lambda) = c_2(I_0, \omega_b, \lambda_b) I_b^2 \frac{\cos(2\omega_b t + 1)}{2} \quad (2.24)$$

$$F_{2,3}(I, \omega, \lambda) = c_2(I_0, \omega_a, \lambda_a, \omega_b, \lambda_b) I_a I_b [\cos((\omega_a + \omega_b)t) + \cos((\omega_a - \omega_b)t)] \quad (2.25)$$

Für die Analyse des Effekts von Gl. (2.25) wird oft die Antwort mit Frequenz $(\omega_a + \omega_b)$ verwendet und diese Technik in Bezug auf Gl. (2.23)–(2.25) „Analyse der zweiten Harmonischen“ genannt. Gleichungen (2.23) und (2.24) repräsentieren Nichtlinearitäten, welche nur in Bezug zu Prozessen von einem der zwei Laser alleine stehen. Im Unterschied dazu repräsentiert Gl. (2.25) nichtlineare (lokale) Wechselwirkungen von Ladungsträgern, welche von beiden Lasern in der Solarzelle generiert werden, was den Schwerpunkt dieses Abschnitts bildet.

Für die CELLO-Messungen in dieser Arbeit dienen zwei konfokale sinusförmig modulierte Laserstrahlen als Anregung und rastern über die Solarzelle, während ein schneller Potentiostat das Potential der Zelle auf 0 mV regelt. Eine Lock-in-Prozedur erlaubt es, Amplitudenbilder ($A_{x,y}$) und Bilder der Phasenverschiebung ($\varphi_{x,y}$) für bis zu 8 Frequenzen simultan während eines Scans über die Solarzelle zu extrahieren; in diesem Abschnitt werden die Bilder für ω_a , ω_b , $2\omega_a$, $2\omega_b$ und $(\omega_a + \omega_b)$ diskutiert. Die Antwort der zweiten Harmonischen wird bei multikristallinen Si-Solarzellen schon verwendet, um nichtlineare Effekte zu analysieren [37], wie solche, die in Bezug zur Abhängigkeit des Injektionsniveaus stehen oder schlechte Ladungstrennung am p-n-Übergang von UMG-Solarzellen in Bereichen starker Kompensation. Für die Tandemsolarzelle, welche in dieser Arbeit untersucht wird, wird das blaue Laserlicht (401 nm) nur in der oberen a-Si-Teilzelle absorbiert, während das IR-Licht (830 nm) hauptsächlich in der unteren μ -Si-Teilzelle absorbiert wird. „Current matching“ bei dieser Zellstruktur bedeutet, dass Photostrom von der oberen Teilzelle und Photostrom von der unteren Teilzelle benötigt wird, um einen Photostrom durch die Tandemzellstruktur zu ermöglichen; dies ist eine extreme Art von nichtlinearer Wechselwirkung und kann somit lokal analysiert werden durch Verwendung von Gl. (2.25). Durch Modulation des IR-Lasers mit ω_a und des blauen Lasers mit ω_b kann „Current matching“ entweder direkt durch das Amplitudenbild $A_{x,y}(\omega_a + \omega_b)$ und das Bild der Phasenverschiebung $\varphi_{x,y}(\omega_a + \omega_b)$ oder durch Berechnung des Amplitudenverhältnisses

$$\frac{A_{x,y}(\omega_a + \omega_b)}{A_{x,y}(\omega_a)A_{x,y}(\omega_b)} = \left| \frac{c_2(I_0, \omega_a, \lambda_a, \omega_b, \lambda_b)}{c_2(I_0, \omega_a, \lambda_a)c_2(I_0, \omega_b, \lambda_b)} \right| \quad (2.26)$$

und den entsprechenden Unterschieden der Phasenverschiebung analysiert werden. Der Nutzen von Gl. (2.26) ist, dass sich lokale Effekte, wie Unterschiede in dem spektral abhängigen Reflexionsvermögen und Unterschiede in lateralen ohmschen Verlusten, gegenseitig aufheben.

2.5 Injektionslevelabhängigkeiten des Photostroms

Bei rückseitenpassivierten Solarzellen gibt es injektionslevelabhängige Rekombination, also Photostromverluste abhängig von der globalen Beleuchtung, wie ebenfalls in [38] diskutiert wird. Durch die globale Beleuchtung wird dabei eine Änderung der Bandverbiegung induziert, welche das lokale S_b verringert und somit den integralen Photostrom erhöht.

2.6 „Parasitic shunting“

„Parasitic shunting“ bedeutet, dass eine Inversionsschicht existiert, welche einen leichten lateralen Stromfluss zu Gebieten ermöglicht, in welchen die photogenerierten Ladungen kurzgeschlossen werden [38]. Dadurch wird der lokale Photostrom reduziert. Eingeführt wurde der Begriff, wie in [38] ausführlicher beschrieben, für Floating-Junction-Solarzellen, welche auf der Zellrückseite eine n-leitende Inversionsschicht aufweisen, welche an den Metallkontakten der Rückseite zu Rekombinationsverlusten führten, also Kurzschluss durch parasitäre Shunts. Bei der hier untersuchten Zelle mit einer p-Typ-Basis existiert ebenfalls eine dünne leitfähige n-Typ-Schicht, die einen leichten Transport von Elektronen zu den Punktkontakten ermöglicht, wo der Kurzschluss durch Rekombination mit Löchern stattfindet. Dieser Mechanismus erhöht die lokalen Verluste der Minoritätsladungsträger auf der Rückseite der Solarzelle und somit S_b .

2.7 Hauptprozessierungsschritte von Standard-Si-Solarzellen

Die Hauptprozessschritte bei der Produktion von industriellen Standard-p-Typ-Si-Solarzellen sind:

Nasschemische Prozessierung (Sägeschadensätze und Texturierung) Nach dem Sägen zu Wafern muss eine ungefähr $10\ \mu\text{m}$ dicke Sägeschadenschicht durch einen nasschemischen Ätzschritt entfernt werden. Dieser Prozessschritt wird in der Regel auch benutzt, um die Zelloberfläche in der μm -Skala aufzurauen (Texturierung), um die Lichtabsorption zu erhöhen.

Emitterdiffusion Der p-n-Übergang wird durch den Phosphordiffusionsschritt erzeugt. Die meisten Standard-Zellen dieser Arbeit wurden durch „Inline“-Diffusion hergestellt. Hierbei wird eine phosphorhaltige Lösung auf die Wafer mittels Rotationsbeschichtung aufgetragen und dann in einem „Inline“-Ofen gefeuert. Das daraus entstehende Diffusionsprofil bestimmt den Schichtwiderstand des Emitters. Durch den Diffusionsschritt bildet sich eine Phosphor-Silikat-Glas-Schicht (PSG-Schicht) auf der Oberfläche, welche auch als Senke für das Gettern von Verunreinigungen während dieses Prozessschritts dient.

Phosphor-Silikat-Glas-Ätzung Die vom Gettern verunreinigte PSG-Schicht wird durch einen HF-Dip entfernt und die Oberfläche chemisch gereinigt.

SiN-Abscheidung Eine $80\ \text{nm}$ dicke SiN-Antireflexbeschichtung (ARC) wird durch plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung (PECVD) auf den Emitter aufgetragen. Die SiN-Schicht dient zusätzlich als Frontseitenpassivierung und fungiert während des nachfolgenden Hochtemperaturschritts – dem Co-Feuern – als Wasserstoffquelle, was die chemische Passivierung von Defekten im Volumen ermöglicht.

Siebdruck und Trocknung Ag-haltige Pasten werden als H-Muster auf die Vorderseite mittels Siebdruck aufgetragen, gefolgt von einem Trocknungsschritt bei typischen

Temperaturen zwischen 200 °C bis 300 °C. Danach werden Al-haltige Pasten auf die ganze Fläche der Rückseite gedruckt und unter gleichen Bedingungen wie die Vorderseite getrocknet.

Co-Feuern Dieser Ausdruck beschreibt die Bildung von Metall-Halbleiter-Kontakten auf der Vorder- und der Rückseite innerhalb eines Feuerschritts. Das typische Temperaturprofil des Co-Feuerschritts ist schematisch in Abb. 2.8 gezeigt. Angegeben sind die charakteristischen Temperaturen für parallel ablaufende Prozesse während des Co-Feuerns:

- **Bildung des Frontkontakts:** Die Paste enthält unter anderem Ag- und Glaspartikel in der Größe von mehreren μm . Bei ungefähr 550 °C beginnt das Glas zu schmelzen und bei ungefähr 700 °C beginnt es, durch die SiN-Schicht zu ätzen. Die Glasschmelze ermöglicht die Auflösung der Ag-Partikel. Beim Herunterkühlen wachsen Ag-Prezipitate epitaktisch auf dem Si und bilden somit den Metall-Halbleiter-Kontakt.
- **Bildung des Rückkontakts:** Aluminium-Partikel von der Rückseitenpaste sind die Quelle für Al-Atome, welche als intrinsische Fremdatome eine p^+ -dotierte Schicht von ungefähr 10 μm an der Rückseite erzeugen, was das sogenannte „back surface field“ (BSF) verursacht. Das Si und das Al bilden eine eutektische Al-Si-Phase während des Co-Feuerns, was einen guten ohmschen Kontakt mit der hoch-p-dotierten Schicht etabliert. Zusätzlich wirkt die eutektische Phase, welche die ganze Rückseite bedeckt, als Rückreflektor für langwelliges Licht².
- **Hydrogenierung:** Wasserstoff wird aus der SiN-Schicht frei, welches Defekte im Volumen chemisch passiviert.
- **Al-P-Co-Gettern [39]:** Wenn die Bildung der AlSi-Legierung einer P-Diffusion folgt, gibt es einen starken Segregationseffekt, welcher aus der Präsenz der flüssigen AlSi-Legierung auf der Waferrückseite herrührt, und als „Trap“ für metallische Verunreinigungen dient. Zusätzlich werden von der Rückseite, ausgehend von der Bildung der AlSi-Legierung, Si-Leerstellen injiziert, welches die Wasserstoffpassivierung (vorheriger Aufzählungspunkt) verstärkt.

Kantenisolierung Ein Laserschnitt mit ein paar μm Tiefe wird 1 mm von der Zellkante gesetzt und der so entstandene Rahmen wird abgekantet. Dieser Schritt entfernt Randshunts vom Diffusionsprozess, welche die Metallisierung der Basis mit dem Emitter kurzschließen.

2.8 Potential-induzierte Degradation (PID) bei Modulen

Bei der Modulherstellung werden 60 Zellen zu sog. „Strings“ verlötet (also im wesentlichen die Zellen in Reihe geschaltet), dann werden diese eingekapselt durch einen La-

²Für Hocheffizienzzellen ist die Qualität des Rückreflektors nicht mehr ausreichend. Er wird durch eine angepasste dielektrische Schicht ersetzt, welche außerdem die Rückseite passiviert.

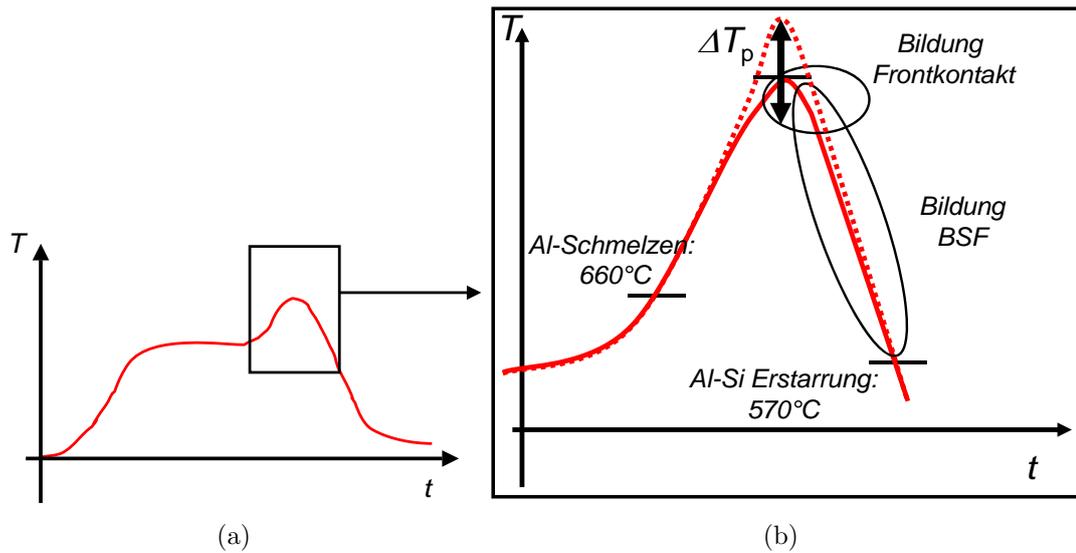


Abb. 2.8: Schema des Temperaturprofils vom Co-Feuerschritt. Die gestrichelte Linie deutet die Variation der Peak-Feuertemperatur T_p an.

minierungsprozess (im Sandwich: Frontschutzglas, transparente EVA-Folie, Zellen, EVA, Rückseitenfolie) und zuletzt ein Al-Rahmen und Verbindungsstecker angebracht.

Die Modulleistung kann potential-induzierter Degradation („Potential Induced Degradation“ oder PID) zum Opfer fallen. Dies kann geschehen, wenn, wie unter normalen Arbeitsbedingungen üblich, zwischen dem geerdeten Modulrahmen und den Zellkontakten eine hohe Spannung anliegt [40], was üblicherweise Nachts geschieht. Auch wurde beobachtet, dass eine hohe Luftfeuchtigkeit PID verstärken kann. Im Allgemeinen kann PID zu dramatischen Verlusten der die Modulleistung führen [41]. Es wurde früher beobachtet, dass die Auswahl von der Modulverkapselungsfolie (EVA-Folie) sowie die Qualität der Siliziumnitrid-Antireflexionsbeschichtung drastisch das Auftreten von PID beeinflussen. Mikroskopische Modelle [42, 43], welche auf TEM-Analysen basieren, legen nahe, dass eine negative Spannung über der dielektrischen Siliziumnitridschicht, welche als Antireflexschicht dient, dazu führt, dass Natriumionen von einem elektrischen Feld getrieben durch die Nitridschicht transportiert werden. Es scheint, dass es der wesentliche Schritt ist, Natrium in den Emitter einzuführen, welches dort Shunts hervorruft, da Zellen mit einer elektrisch besseren leitfähigen Nitridschicht keine Anreicherung von Natriumionen an der Nitrid-Emitter-Grenzfläche und auch kein PID zeigen.

Kapitel 3

Experimentelles

3.1 Messprinzip

Während einer Messung wird die Solarzellenprobe durch weißes Halogenlicht beleuchtet, um die Arbeitsbedingungen einer Solarzelle herzustellen, es entsteht also eine typische I - V -Kennlinie einer beleuchteten Solarzelle, vgl. Abb. 3.1. Zusätzlich wird die Zelle von einem intensitätsmodulierten Laserstrahl gerastert und ihr lineares Antwortsignal, potentiostatisch (Stromantwort dI) mit konstant anliegender Spannung oder galvanostatisch (Spannungsantwort dU) mit konstantem Strom, an verschiedenen Arbeitspunkten entlang der Kennlinie aufgenommen, wie in Abb. 3.1 und 3.2 dargestellt. Im jetzigen CELLO-Aufbau stehen vier unterschiedliche Laserfarben mit dementsprechend unterschiedlichen Eindringtiefen zur Verfügung.

Die zwei wesentlichen Messmodi sind:

- Standard-Modus: Die Amplitude des Antwortsignals eines Lasers an verschiedenen Arbeitspunkten entlang der Kennlinie wird verwendet. Aufgrund des Steigungsverlaufs der Kennlinie werden typischerweise dI -Bilder bei Kurzschlussbedingungen (SC, für „short circuit“) und am Punkt maximaler Leistung (MPP, für „maximum power point“) sowie die dU -Bilder am Punkt maximaler Leistung und bei offener Klemmspannung (OC für „open circuit“) vermessen. Details dazu in Abschnitt 3.3.1.
- Photoimpedanz-Modus: Es werden Bilder der Amplituden und Phasenverschiebungen von mehreren Perturbationsfrequenzen und mehreren Laserwellenlängen unter Kurzschlussbedingungen verwendet. Details dazu in Abschnitt 3.3.2.

Die genaue Messung der linearen Antwort des Kleinsignals ist sehr schwierig, da es in einem Großsignal verborgen ist, vgl. Abb. 3.2. Bei einer normalen Messung liegt die Kleinsignalamplitude $dI_{SC} = 40 \mu\text{A}$ auf einem Großsignal von $I_{SC} = 3 \text{ A}$. Dieses schlechte Signal-zu-Rausch-Verhältnis hat zwei Konsequenzen:

1. Der ganze Aufbau muss so optimiert werden, dass das beste Signal-zu-Rausch-Verhältnis erhalten wird, z. B. durch Verwendung von rauscharmer Hardware.
2. Ein Lock-in-Verstärker wird verwendet.

Der Lock-in-Verstärker ist durch Software realisiert: Die Lock-in-Frequenz ist durch das sinusförmige periodische Perturbationssignal des Lasers ($\omega = 2\pi f$) gegeben. Eine

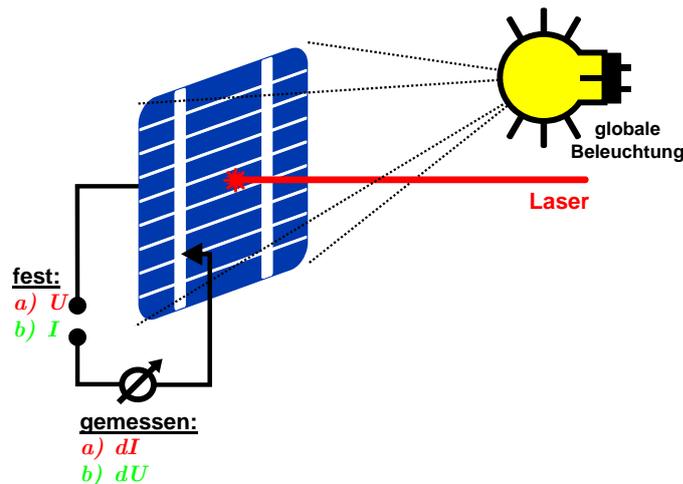


Abb. 3.1: CELLO-Messprinzip: Eine Solarzelle unter Arbeitsbedingungen unter weißer Beleuchtung wird mit einem intensitätsmodulierten Laserstrahl gerastert. Die Kleinsignalantwort aufgrund der zusätzlichen lokalen Laserbeleuchtung bei festgelegten Spannungen (potentiostatisch, Stromantwort dI) oder festgelegten Strömen (galvanostatisch, Spannungsantwort dU) entlang der I - V -Kennlinie wird analysiert durch eine Lock-in-Prozedur und ausgegeben.

Messkarte („data acquisition board“ oder DAB) liest die komplette Kleinsignalantwort ein, und mittels der Software werden die Amplitude und die Phasenverschiebung der linearen Antwort berechnet.

3.2 Hauptkomponenten der Hardware

In Abb. 3.3 werden die Hauptkomponenten der Hardware vorgestellt. Der Computer (Software), die Laseroptik, die Solarzellenprobe und die CELLO-Einheit bilden die Feedback-Schleife der Messung, den Kern einer jeden Messung. Andere Feedback-Schleifen regeln die Intensität der globalen Beleuchtung, temperaturabhängige Lichtschwankungen der Halogenlampen werden also kompensiert, oder die Temperatur der Solarzelle auf 25 °C . Das CELLO-Rack ist an einen Messcomputer, einen Thermostat (Julabo) und einen Druckluftanschluss angeschlossen. Das komplette CELLO-Gerät ist in Abb. 3.4 a) und die geöffnete Kontaktierungseinheit mit einer eingebauten Solarzelle in Abb. 3.4 b) zu sehen. Es werden die anliegende Spannung zwischen der Referenzelektrode (R) und der Senseelektrode (S) und der Strom durch die Arbeitselektrode (W für „working electrode“) und durch die Gegenelektrode (C für „counter electrode“) gemessen. Diese Vierleiter-Messanordnung hat den Vorteil, dass Leitungswiderstände und Anschlusswiderstände (Kontaktwiderstände der Elektroden) die Messung nicht verfälschen. Die Gegenelektroden auf der Zellfrontseite sind parallel verschaltet, so dass sich die Teilströme zum Gesamtstrom addieren. Das Signal der hochohmigen Referenzelektrode wird elektronisch gemittelt, so dass die im Mittel anliegende Spannung verwendet wird (mit den Kippschaltern lassen sich die

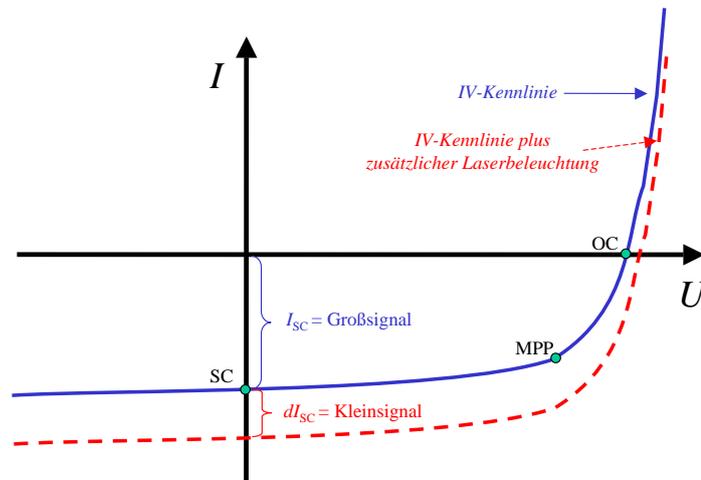


Abb. 3.2: Die gestrichelte Linie stellt die Änderung einer I - U -Kennlinie bei zusätzlicher Laserbeleuchtung dar. An jedem Punkt der Messung besteht das Signal aus einem Groß- und einem Kleinsignal, so wie es für Kurzschlussbedingungen (SC) illustriert ist.

Referenzelektroden manuell hinzuschalten).

In den folgenden Abschnitten werden die wesentlichen Teile der CELLO-Hardware, ihre Wechselwirkung und die Standardmessmodi kurz vorgestellt.

3.2.1 CELLO-Einheit

Die vier Messelektroden (R, S, W und C) sind in Abb. 3.3 bis Abb. 3.5 gekennzeichnet. Abbildung 3.5 stellt die Hauptbestandteile der CELLO-Einheit vor, d. h. den Regler/Akzelerator, die Spannungsmessung, die Strommessung und ein Feld von Verstärkern und Hoch- und Tiefpassfiltern als Verbindung zur Messkarte (DAB). Der aktive Regelkreis von CELLO funktioniert wie folgt: Um potentiostatische Bedingungen zu erreichen, wird der Sollwert der Spannung (U_{fest}) mit der aktuell anliegenden Spannung zwischen Referenz- und Senseelektrode an der Solarzelle verglichen, und ein zusätzlicher Regelstrom I wird via der Gegenelektrode in die Zelle injiziert, um den aktuellen Spannungsabfall zu reduzieren/auszugleichen. Kondensatoren CF und Potentiometer RF lassen sich so einstellen, dass die schnellste Regelung ohne Regeloszillation möglich ist. Der injizierte Strom verlässt die Zelle über die Arbeitselektrode (W) und wird an der virtuellen Masse von einem identischen inversen Gegenstrom eliminiert. Der Spannungsabfall dieses Gegenstroms über einen Widerstand (im CELLO-Programm „Current Scale“ genannt) wird vermessen. Für die Messung aller Signale (für I und U) werden die Signale in Wechselstromanteil (ac) und Gleichstromanteil (dc) aufgeteilt, ggf. verstärkt und hoch- oder tiefpassgefiltert, bevor sie von der Messkarte aufgenommen werden.

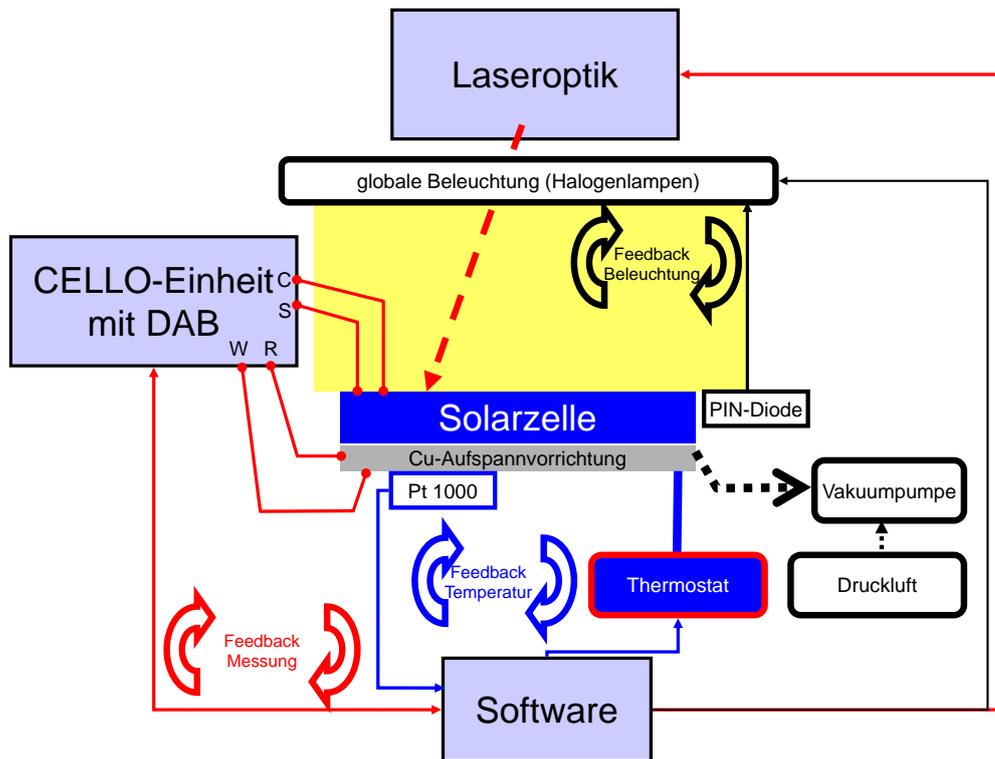


Abb. 3.3: Hauptkomponenten der Hardware und verschiedene Feedback-Regel-Schleifen (zu Details der CELLO-Einheit siehe Abb. 3.5, zu Details der Laseroptik siehe Abb. 3.7). Der Regelkreis der Messung (rot) repräsentiert den Signalweg einer Messung und wie die aktive Regelung des Potentiostaten der CELLO-Einheit für feste Spannungen oder Ströme sorgt. Durch den Temperatur-Regelkreis (blau) wird die Cu-Aufspannvorrichtung auf typischerweise $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ geregelt. Durch den Beleuchtungsregelkreis (schwarz) wird die Intensität der Halogenlampen auf typischerweise $1/3$ Sonne geregelt und so eine thermische Drift der Lichtintensität kompensiert. Bei der temperierten Cu-Aufspannvorrichtung sorgt die Zellansaugung mittels Unterdruck (Vakuum) für ausreichend thermischen und elektrischen Kontakt.

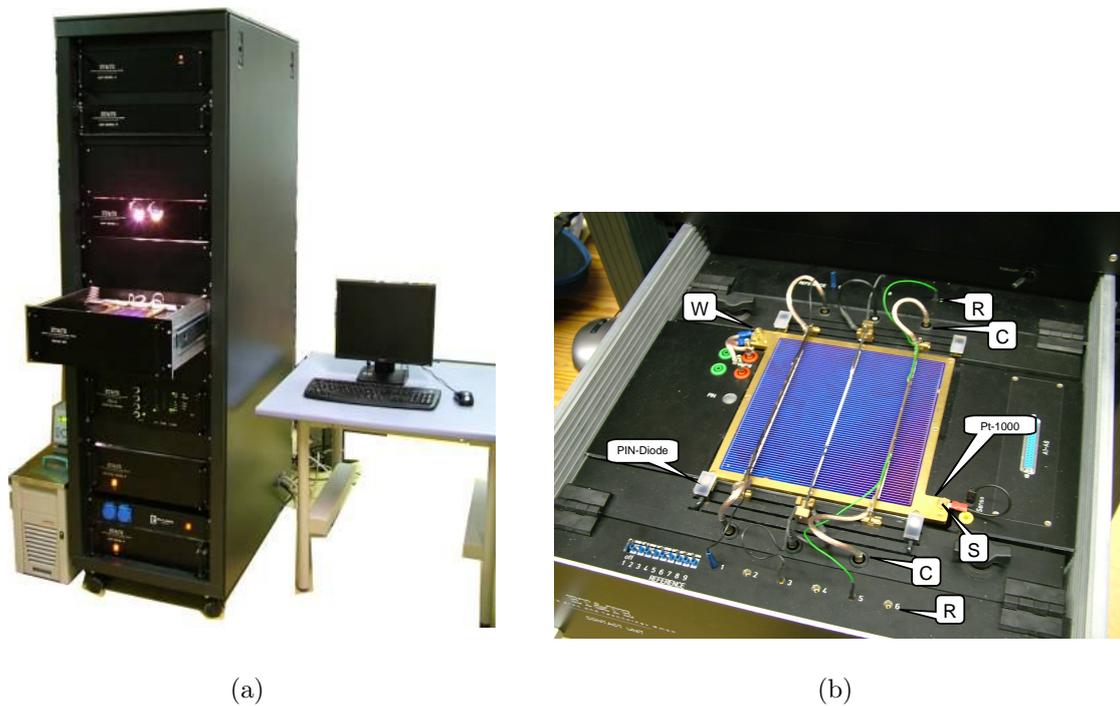


Abb. 3.4: a) Komplettes CELLO-System mit Rack, Thermostat (Julabo) und Messrechner. b) Kontaktierungseinheit mit eingelegter Solarzelle. Die Spannung wird zwischen Referenzelektrode (R) und Senselektrode (S) vermessen. Der Strom fließt durch die Arbeitselektrode (W) und die Gegenelektrode (C). Auf dem mittleren „Mainbusbar“ ist die Kontaktierung durch Drahtelektroden realisiert und an den äußeren „Mainbusbars“ durch Sammelschienen. Die vier PIN-Dioden sind die Lichtsensoren für den Beleuchtungsregelkreis, und der Pt-1000 ist der Temperatursensor für den Temperaturregelkreis.

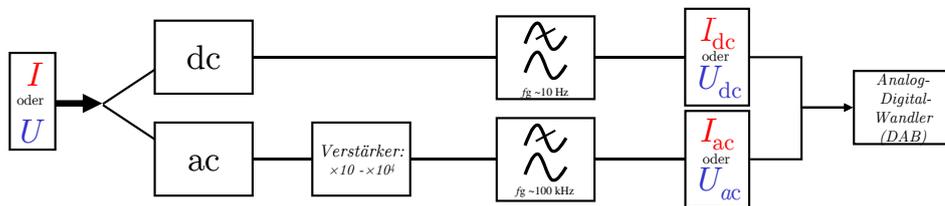
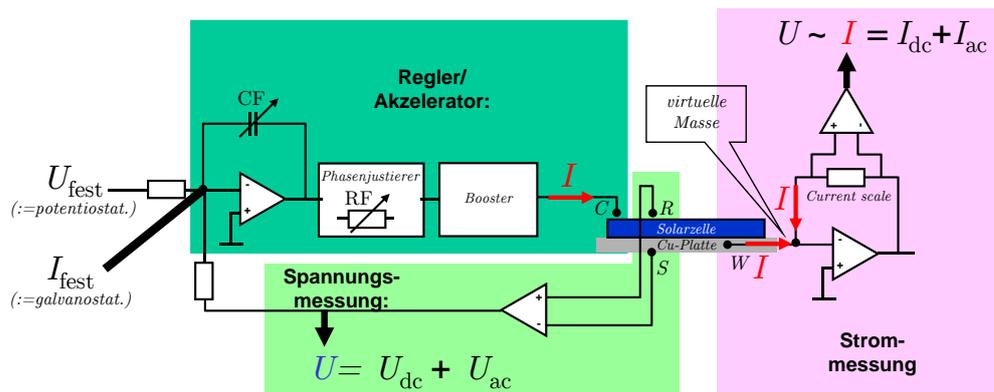


Abb. 3.5: Schematischer Aufbau der CELLO-Einheit mit Regler/Akzelerator, Spannungs- und Strommessung und einem Feld aus Verstärkern und Filtern für die Signale; Details im Text.

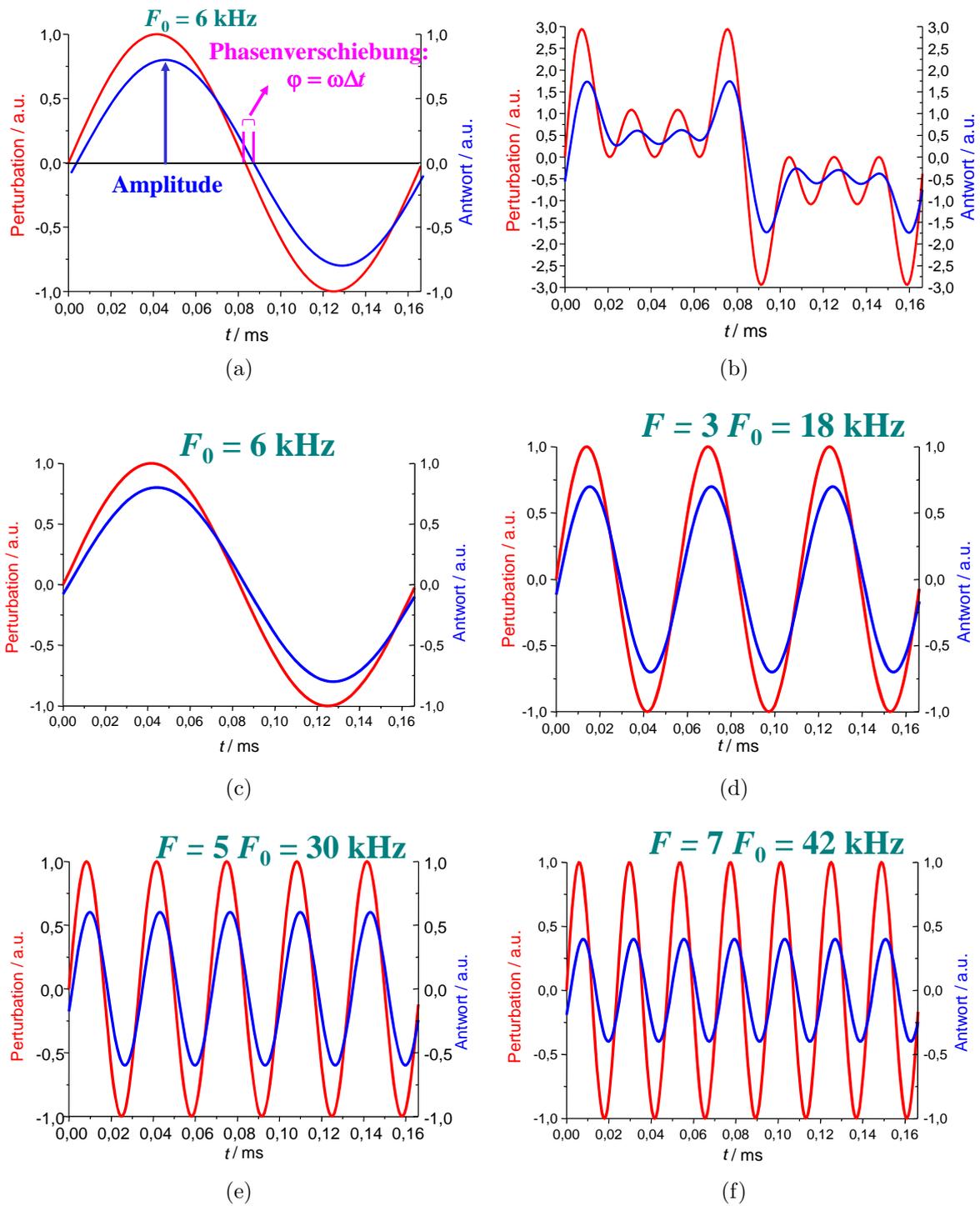


Abb. 3.6: Das Perturbationssignal (rot) und das lineare Antwortsignal (blau) in willkürlichen Einheiten („a.u.“ für „arbitrary units“) aufgetragen gegenüber der Zeit für mehrere verschiedene Perturbationsfrequenzen. a) Die Werte der Amplitude und der Phasenverschiebung, d. h. der Zeitversatz zwischen Perturbation und Antwort, werden für jede Perturbationsfrequenz aufgezeichnet. b) Typisches Multi-Frequenzsignal und c)–f) deren Einzelfrequenzen F_0 . Der Faktor vor F_0 gibt das Vielfache der Grundfrequenz an.

3.2.2 Software-Lock-in-Verstärker

Die typische Lösung zur Messung von Kleinsignalen, verborgen im Rauschen (eines Großsignals), ist die Verwendung eines Lock-in-Verstärkers. In unserem Fall wird dieser durch einen Software-Lock-in-Verstärker realisiert, d. h. die Antwort auf eine sinusförmige Perturbation der Laserlichtintensität wird von der Messkarte eingelesen und die Messdaten durch die CELLO-Software ausgewertet. Abbildung 3.6 a) zeigt das sinusförmige Perturbationssignal des Lasers in Rot und das aufgenommene lineare Antwortsignal in Blau. Die Lock-in-Routine berechnet vom Antwortsignal die Amplitude und die Phasenverschiebung, d. h. den Zeitversatz zwischen Perturbation und Antwort, gemessen über mehrere Perioden. Diese Software-Lock-in-Lösung hat die folgenden Vorteile:

1. Die Hardwarekosten für die sehr gute Messkarte sind um einiges geringer als die Kosten für einen Lock-in-Verstärker.
2. Die Synchronisation der Laserrasterung mit der Startzeit für die Mittlung der Lock-in-Routine ermöglicht eine drastische Verkürzung der Gesamtmesszeit.
3. Die Möglichkeit, Multifrequenzspektren (vgl. Abb. 3.6) aufzunehmen, ermöglicht es, mit mehreren Perturbationsfrequenzen gleichzeitig zu arbeiten.
4. Das gesamte Frequenzspektrum des Antwortsignals steht zur Verfügung und nicht nur eine Frequenz, wie wenn ein Hardware-Lock-in-Verstärker verwendet wird. Dadurch ist es möglich, Nichtlinearitäten über die zweite Harmonische zu vermessen.

3.2.3 Optik: Konfokaler Scan mit vier Lasern

Optischer Aufbau

Abbildung 3.7 zeigt die Kernkomponenten der Optik. Dieses sind die vier Laser mit verschiedener Wellenlänge – 403 nm (Blue), 650 nm (RED), 830 nm (IR) und 934 nm (SIR) –, halbtransparente Spiegel, Absorptionsfilter, auch Graustufenfilter (GF) genannt, eine parallel zum Strahlengang verstellbare Fokulinse und ein Scanspiegel (Scangine), welcher die x-y-Rasterung des Laserstrahls übernimmt. Für die Entwicklung der Optik gab es drei harte Randbedingungen:

1. Die Länge des Strahlengangs von ungefähr 1 m. Diese Länge ist notwendig, um die Projektionsfläche des Scanspiegels auf eine Größe von 156 mm \times 156 mm, was die Größe einer kommerziellen Standard-Solarzelle ist, aufzuweiten.
2. Eine variable Fokusfleckgröße von 50 μm bis 2000 μm für Rasterbilder mit sehr großer und sehr kleiner Vergrößerung. Die Einstellung der Fokusfleckgröße erfolgt durch zum Strahlengang paralleles Verschieben der Fokulinse, angetrieben von einem Schrittmotor.
3. Alle Laserfarben benötigen eine konfokale Positionierung. Dies ist notwendig für Photoimpedanzmessungen oder wenn ein Laser als konstante Beleuchtungsquelle dienen soll (z. B. benötigt bei der Charakterisierung von Stapelsolarzellen), damit die verschiedenfarbigen Laser auf jeden Fall den gleichen Punkt auf der Zelle beleuchten.

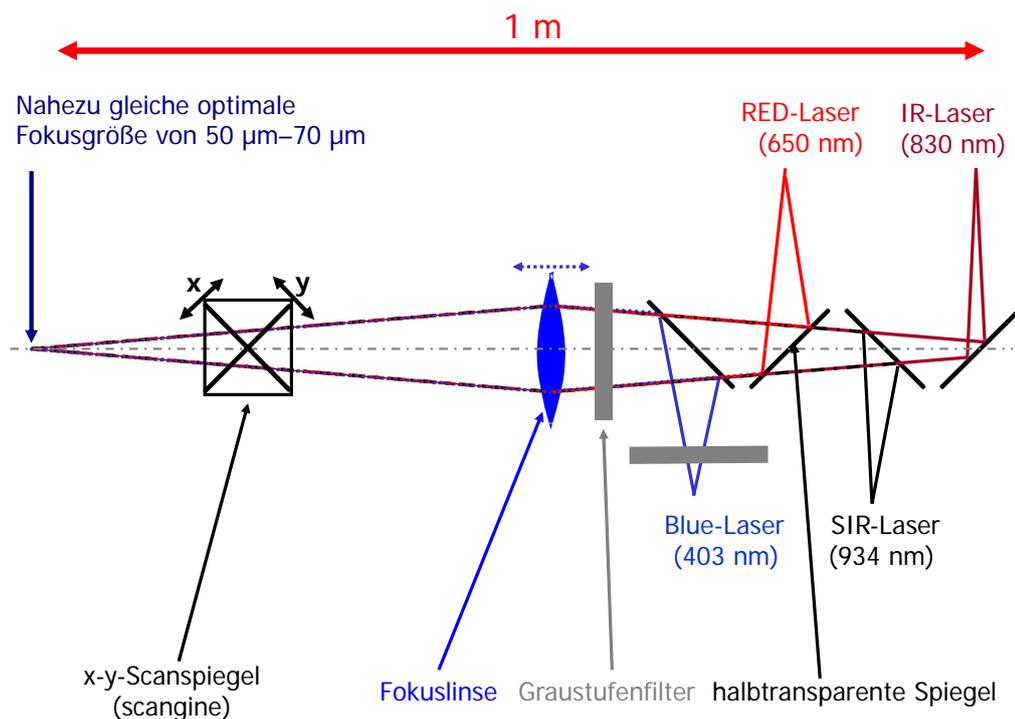


Abb. 3.7: Schema des Strahlengangs mit vier konfokalen Lasern. Fokuslinsen an den Lasern (hier nicht eingezeichnet) weiten den Laserstrahl auf. Die Position der Fokuslinse kann mit Hilfe eines Schrittmotors geändert werden, was eine Variation der Fokusfleckgröße von 50 μm bis 2 mm erlaubt. Alle Spiegel, Linsen und Graustufenfilter sind mit speziell entwickelten optischen Beschichtungen ausgestattet, um Reflexionen oder andere ungewollte Wechselwirkungen zu vermeiden.

Der Zweck der Graustufenfilter (GF) ist es, das lokale Injektionsniveau einzustellen. Ohne einen GF und mit $50\ \mu\text{m}$ Fokusfleckgröße ist das Injektionsniveau beim Laserfleck ungefähr in der Größenordnung von 30 Sonnen. Für normale Solarzellen ist dies weit entfernt von den normalen Arbeitsbedingungen, welche bei 1 Sonne liegen. Für eine typische CELLO-Messung sind die Graustufenfilter so gewählt, dass von ihnen ungefähr 95 % der Laserlichtintensität absorbiert wird.

Alle optischen Kernkomponenten haben speziell angepasste Beschichtungen, um erstens ungewollte Reflexionen zu verhindern, welche die Messung verfälschen, und um zweitens für die gewünschten Laserfarben gut durchlässig zu sein bzw. diese gut zu spiegeln.

Beispiel für die Justierarbeit

Für die korrekte Installation eines neuen Lasers mit den dazugehörigen halbdurchlässigen Spiegeln gibt es 13 freie Parameter, welche optimiert werden müssen, um einen wirklich konfokalen Aufbau zu erhalten:

- Fokuslinse des Lasers,
- 3 Schrauben des Laserhalters an der optischen Grundplatte,
- 4 Schrauben am Laserhalter (Feinabstimmung),
- Translation (senkrecht zum Strahl) und Rotation des halbtransparenten Spiegels,
- 3 Schrauben zur Feinabstimmung am Halter des halbtransparenten Spiegels.

Während dieser Arbeit wurde eine Optimierungsroutine hierfür entwickelt. Jetzt benötigt man für die Justage eines neuen Lasers ungefähr einen halben Tag. Nach unserem Wissen gibt es mehrere andere Gruppen auf der Welt, die einen ähnlichen optischen Aufbau mit konfokalen Lasern versuchten zu justieren, aber letztlich erfolglos blieben. Dies verdeutlicht den Schwierigkeitsgrad dieser Aufgabe.

Kalibrierung der Fokusfleckgröße

Für korrekte Photoimpedanzmessungen müssen die Fokusflecke aller Laser an der gleichen Position genau übereinanderliegen und eine identische Fokusfleckgröße aufweisen. Im folgenden wird kurz die Routine beschrieben, welche die Fokusfleckgröße kalibriert. Abbildung 3.8 zeigt Linienscans senkrecht über eine Rasierklinge (in x -Richtung entlang des weißen Pfeils in Abb. 3.8 a)). Aus jedem Linienscan lässt sich mit der Annahme, dass die Intensitätsverteilung im Fokusfleck gaußförmig ist, eine Fokusfleckgröße berechnen. Abbildung 3.8 b) zeigt die Linienscans von fünf Fokusflecken mit unterschiedlichen Größen, aus denen dann die Fokusfleckgröße berechnet wird. Die Fokusfleckgröße kann durch Verstellen der Fokuslinse entlang des Strahlengangs, was durch einen Schrittmotor gesteuert wird, geändert werden. Abbildung 3.9 zeigt die Fokusfleckgröße in Abhängigkeit zur Schrittposition an. Man erkennt, dass alle Laserfarben bei ungefähr 25.000 Schritten eine minimale Fokusfleckgröße von ungefähr $50\ \mu\text{m}$ besitzen. Diese Kurve wird von der CELLO-Software verwendet, um für jede Messung die gewählte Fokusfleckgröße einzustellen. Gut ist auch zu erkennen, dass alle Laserfarben für die Photoimpedanzmessung

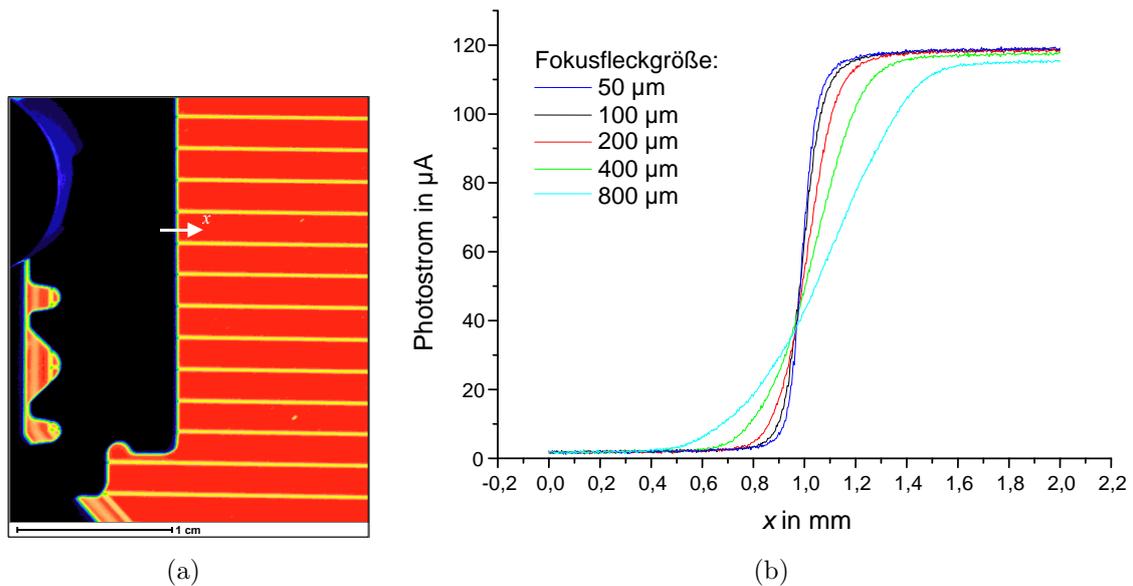


Abb. 3.8: a) Photostrombild mit eingezeichneter Linienscanrichtung (weißer Pfeil) senkrecht zur Rasierklinge. Deutlich ist die Kontur der Rasierklinge als Gebiet mit niedrigem Photostrom zu erkennen. b) Linienscans mit unterschiedlicher Fokusfleckgröße durch Verschieben der Fokuslinse entlang des Strahlengangs. Aus dem Profil dieser Linienscans wird mit einem Algorithmus, der einen gaußförmigen Laserfokusfleck voraussetzt, die Fokusfleckgröße berechnet.

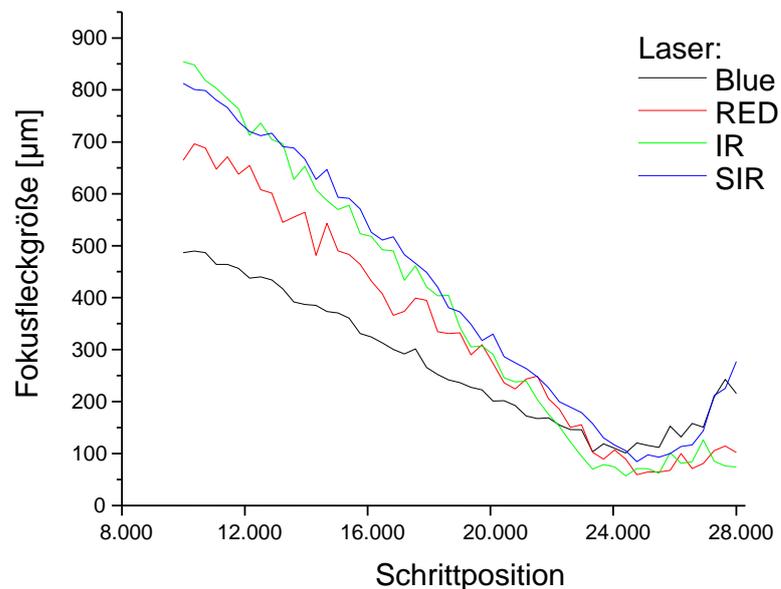


Abb. 3.9: Fokusfleckgröße aller Laser als Funktion der Position der Fokuslinse, gemessen in Schritteinheiten des eingesetzten Schrittmotors. Alle Laser haben bei ca. 25 000 Schritten eine minimale Fokusfleckgröße von ungefähr 50 μm .

(RED, IR und SIR) die gleiche Steigung besitzen. Somit ist der Fokusfleck bei jeder im Programm eingestellten Größe für alle Laser auch wirklich gleich. Die Kurve ist extrem abhängig von der Einstellung der Fokuslinsen der Laser, weshalb der Zeitaufwand, um eine solche Einstellung mit genau übereinanderliegenden Fokusfleckminima wie in Abb. 3.9 zu erreichen, relativ hoch ist.

3.3 Messmodi

Dieser Abschnitt beschreibt kurz, wie während einer typischen CELLO-Messung die Messdaten generiert und ausgewertet werden. Wenn es nicht anders ausdrücklich erwähnt wird, erfolgten die Messungen dieser Arbeit wie hier beschrieben.

Allen Messungen ist gemein, dass die Vakuum-Aufspannvorrichtung für guten elektrischen und thermischen Kontakt verwendet wird. Die Temperatur wurde auf 25 °C mit einer Genauigkeit von ± 0.1 °C geregelt. Wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, gibt es zwei Hauptmessmodi: Erstens den Standard-Modus (Amplitudenbilder für verschiedene Arbeitspunkte auf der Kennlinie) und zweitens den Photoimpedanz-Modus (Bilder von Amplituden und Phasenverschiebung bei Kurzschlussbedingungen). Beide werden im Folgenden genauer diskutiert.

3.3.1 Standard-Modus

Messdaten

Für die typische Standard-CELLO-Messung wird die Zelle mit 1/3 Sonne konstanter globaler Beleuchtung durch Halogenlampen betrieben und fünf Bilder entlang der Kennlinie vermessen, nach Tabelle 3.1. Die Perturbationsfrequenz ist dabei ca. 6 kHz und mit einer Mittelungszeit der Lock-in-Prozedur von 15 Perioden ergeben sich bei einer Fokusgröße von 200 μm und somit einem Bild mit ca. 1 Mio. Pixel für die komplette Messzeit einer kommerziellen Solarzelle ungefähr 3,5 Stunden. Ein typisches CELLO-Bild zur Illustration der hohen Ortsauflösung ist im Anhang in Abschnitt A.1 präsentiert. Als Beispiel einer solchen Standardmessung ist der komplette Messdatensatz im Anhang in Abschnitt A.2 gezeigt.

Auswertung

Für die folgende Datenauswertung von Messungen des Standard-Modus werden mehrere Bilder berechnet, indem nur die Amplituden-Bilder der Kleinsignalantwort, benannt als dI und dU wie in Tabelle 3.1 und Abb. 3.10 beschrieben, verwendet werden.

Shunt-Bilder Bilder berechnet nach

$$\text{calc1} = \left(\frac{dI1}{dI2} - 1 \right) \times 1000 \quad (3.1)$$

ergibt das sog. Shunt-Bild. Die Gleichung bedeutet, dass der lokale Amplituden-Wert des $dI1$ -Bildes durch das entsprechende lokale Amplituden-Bild vom $dI2$ -Bild geteilt wird. In

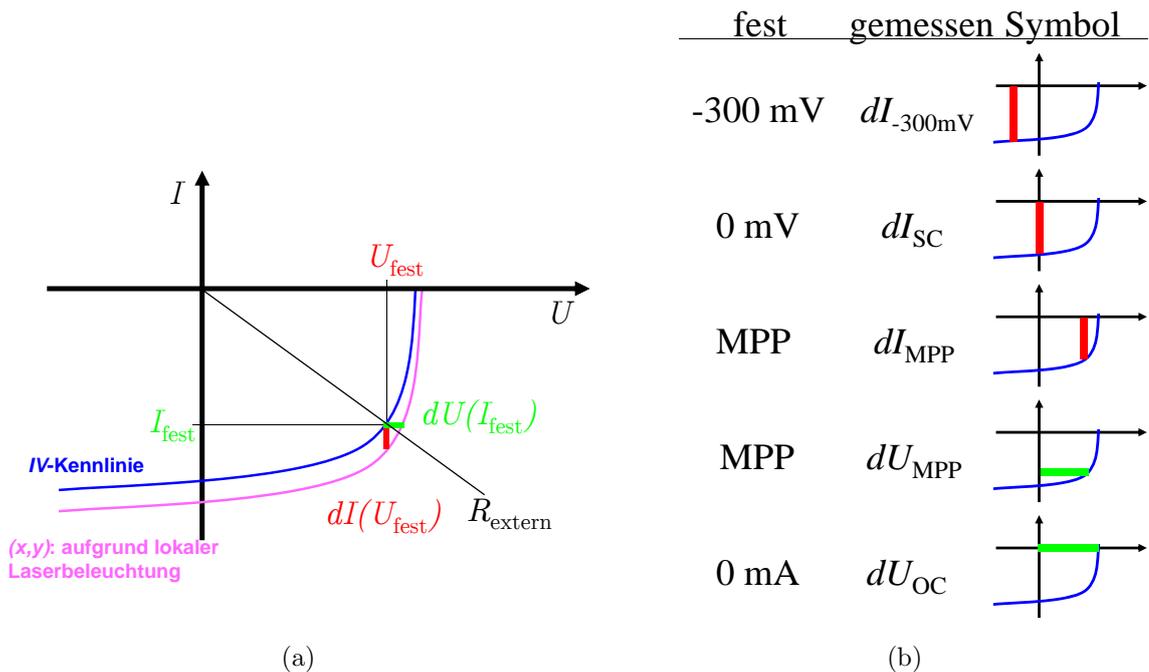


Abb. 3.10: a) Potentiostatische (rot) und galvanostatische (grün) Antwort von einer gemessenen Zelle an einem bestimmten Punkt auf der Solarzelle (x,y) entlang der Kennlinie. b) Bezeichnung von Messpunkten entlang der Kennlinie für den Standard-Modus.

diesen Bildern werden Verluste aufgrund ohmscher Shunts, wie sie z. B. durch metallische Partikel entstehen, welche den p-n-Übergang kurzschließen, als große Werte, also in Rot, dargestellt. Im Anhang in Abb. A.4 a) wird diese Auswertung für eine kommerzielle multikristalline Si-Solarzelle gezeigt.

Bilder des Leistungsverlusts $dI2$ beschreibt als Bild die normale Rekombination. Zusätzliche (Rekombinations-) Verluste in Durchlaßrichtung am Punkt maximaler Leistung (MPP) werden erhalten durch die Berechnung von

$$\text{calc2} = (dI3/dI1) \times 1000 \quad (3.2)$$

und

$$\text{calc3} = (dU1/dI1) \times 1000. \quad (3.3)$$

Sichtbar in schwarz ist in diesen Bildern die zusätzliche Rekombination in Durchlaßrichtung, wie z. B. aufgrund von Rekombination an Korngrenzen oder Abhängigkeiten des Injektionsniveaus, verursacht z. B. von einem inhomogenen BSF. Auch Bereiche mit erhöhtem Serienwiderstand, wie durchbrochene Gridfinger, werden als schwarze Bereiche aufgelöst. Kurzum, diese Bilder enthalten eine Menge quantitativer Informationen über Verluste der Zelle und darüber was wirklich den Wirkungsgrad der Zelle limitiert. Wie in [44] oder [45] präsentiert, handelt es sich hierbei um ein ausgezeichnetes Werkzeug, um die quantitativen Verluste einer Zelle zu analysieren und weiteres Verbesserungspotential des Zell- oder Modulprozesses zu identifizieren. Im Anhang in Abb. A.4 b) bis c) wird diese Auswertung für eine kommerzielle multikristalline Si-Solarzelle gezeigt.

Bilder des Serienwiderstands Zuerst wird ein Bild berechnet nach

$$\text{calc4} = (dU2/dI1) \times 1000. \quad (3.4)$$

Danach wird das Serienwiderstandsbild berechnet nach Abschnitt 2.2. Hierfür werden das calc4-Bild und die I - V -Kennliniendaten verwendet. Ein Algorithmus, welcher die Histogramminformationen verwendet, wird auf das calc4-Bild angewendet, wie in Abschnitt 2.2 beschrieben. Flächen mit erhöhtem Serienwiderstand, wie z. B. durchbrochene Gridfinger oder Probleme während des Co-Feuerns der metallischen Frontkontakte, sind in Rot sichtbar. Letzteres ist als Beispiel für eine kommerzielle multikristalline Si-Solarzelle im Anhang in Abb. A.4 e) gezeigt.

Punkt an der Kennlinie	Betriebsweise	Dateinamenserweiterung	Name
-300 mV	potentiostatisch	.U01	$dI1$
SC	potentiostatisch	.U02	$dI2$
MPP	potentiostatisch	.U03	$dI3$
MPP	galvanostatisch	.I01	$dU1$
OC	galvanostatisch	.I02	$dU2$

Tabelle 3.1: Namen und Dateinamenserweiterungen, wie sie in der CELLO-Software verwendet werden.

3.3.2 Photoimpedanz-Modus

Messdaten

Abb. 3.11 zeigt den Aufbau für die Messungen der Waferdicke d_W von Solarzellen mit Hilfe eines USB-gesteuerten Kamera-Mikroskops. Weil diese Methode kontaktlos funktioniert, ist das Risiko von Zellbruch oder -Beschädigung sehr stark reduziert. Die Dicke der Solarzelle ist essentiell für die korrekte Bestimmung der Photoimpedanz, da sie nach Gl. (2.8) die Dicke des Wafers enthält.

Zur Verbesserung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses werden die Photoimpedanzmessungen meistens im Dunkeln durchgeführt, also ohne globale Beleuchtung. Pro Scan wird nur eine Laserwellenlänge verwendet mit 4 verschiedenen Perturbationsfrequenzen ($\omega = 2\pi f$) nach Tabelle 3.2, um nichtlineare Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Lasern auszuschließen. Somit werden für einen kompletten Datensatz drei Scans nacheinander mit dem RED-, IR- und dem SIR-Laser durchgeführt. Die Mittelung mit 33 Perioden resultiert in einer Messzeit von 3 Stunden für einen kompletten Datensatz einer Standard-Solarzelle.

Besonders für große Solarzellen bei hohen Modulationsfrequenzen des Laserlichts ist eine perfekte potentiostatische Kontrolle durch den Potentiostaten schwierig. Auch sehr kleine Spannungsänderungen $\Delta U(\omega)$ (im μV -Bereich) führen bei großflächigen Solarzellen zu signifikanten Stromflüssen $\Delta I(\omega)$ (im wesentlichen durch eine kapazitive Umladung über der Raumladungszone), quantitativ beschrieben durch

$$\Delta I(\omega) = \frac{\Delta U(\omega)}{Z(\omega)}, \quad (3.5)$$

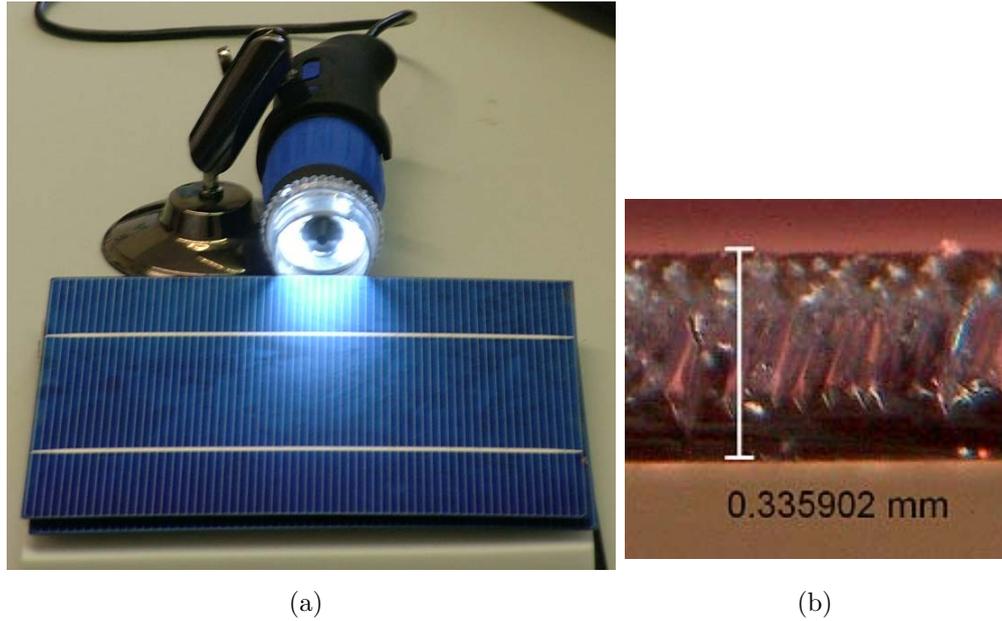


Abb. 3.11: a) Aufbau des USB-gesteuerten Kamera-Mikroskops für Waferdickenmessungen von Solarzellen. b) Typisches Mikroskopbild von einer Zelle (Seitenansicht), welches für die Dickenmessung wie dargestellt verwendet wird. Im Gebrauch ist die Genauigkeit dieser Methode im μm -Bereich.

wobei $Z(\omega)$ die Spannungsimpedanz der Solarzelle ist und somit leicht für eine globale Solarzelle gemessen werden kann. Zur korrekten Bestimmung der lokalen Photoströme werden deshalb sowohl die Ströme ΔI_{ges} als auch die Spannungsdatensätze ΔU vermessen. Für die Stromantwort ergibt sich wie oben geschrieben $\Delta I_{\text{ges}}(\omega) = \Delta I_{\text{Ph}}(\omega) + \Delta I(\omega)$ und somit

$$\Delta I_{\text{Ph}}(\omega) = \Delta I_{\text{ges}}(\omega) - \frac{\Delta U(\omega)}{Z(\omega)}. \quad (3.6)$$

Gleichung (3.6) liefert nahezu perfekt korrigierte Photostrombilder: Im Anhang in Abb. A.5 ist $Z(\omega)$ für eine multikristalline Si Solarzelle gezeigt. Die darauf folgende Abb. A.6 zeigt die deutliche Änderung durch die Korrektur an einem Datensatz mit hoher Frequenz.

Dateinamenserweiterung	Fenstername	Frequenz [Hz]	Bildtyp	Einheit
.U01 a	dI1a	6578.95	$dI(\omega)$	μA
.U01 b	dI1b	10167.47	$dI(\omega)$	μA
.U01 c	dI1c	18540.68	$dI(\omega)$	μA
.U01 d	dI1d	22129.20	$dI(\omega)$	μA
.U01 o	dI1o	6578.95	$dU(\omega)$	μV
.U01 p	dI1p	10167.47	$dU(\omega)$	μV
.U01 q	dI1q	18540.68	$dU(\omega)$	μV
.U01 r	dI1r	22129.20	$dU(\omega)$	μV

Tabelle 3.2: Namen und Dateinamenserweiterungen, wie sie in der CELLO-Software für Messungen der Photoimpedanz verwendet werden.

Glättung der Phasenverschiebung Aufgrund z. B. von Abschattung durch das Grid können sich Amplituden des Photostromes dicht benachbarter Positionen stark ändern. Dies gilt nicht für die Phasendaten, da z. B. die laterale Kopplung durch Diffusion keine starke laterale Änderung der Phase erlaubt. Messrauschen in den Phasendaten kann deshalb durch eine Glättung (im wesentlichen ein Medianfilter) signifikant reduziert werden, ohne Ortsauflösung zu verlieren. Ein Beispieldatensatz so präparierter Photostrombilder ist im Anhang von Abb. A.7 bis A.9 dargestellt. Die Verbesserung der Datensätze aufgrund der Glättung ist durch Vergleich der Bilder Abb. A.6 f) und A.9 h) gut zu erkennen.

Fit der Photoimpedanzdaten

„Least square“-Fitten beschreibt eine mathematische Optimierung, bei der N Messdaten an ein physikalisches Modell mit M Parametern angepasst werden. Ist M deutlich kleiner als N , so führt dieser Prozess zu einer effektiven Rauschunterdrückung und erlaubt die Interpretation der Messdaten direkt durch physikalische Parameter, die dem Problem intrinsisch angemessen sind.

Die CELLO-Software stellt viele verschiedene Modellfunktionen zur Auswahl, welche alle von dem in Abschnitt 2.3 vorgestellten Modell abgeleitet wurden. Sie unterscheiden sich in ihren lokalen und globalen Fitparametern voneinander, d. h. welche Parameter durch eine einzige Zahl bestimmt werden (global) oder welche für jeden Punkt des Bildes gelten (lokal). Zum Beispiel wurde herausgefunden, dass es sich bei der Waferdicke d_W meistens um einen guten globalen Fitparameter handelt: Für die Anpassung sehr vieler Solarzellen war es ausreichend, für einen guten Fit nur eine Zahl für d_W anzunehmen. Im allgemeinen ist der Vorgang des Findens und Auswählens der geeigneten Modellfunktion mit der besten Auswahl an globalen und lokalen Fitparametern ein sehr zeitintensiver Prozess.

3.4 Details zu den durchgeführten Messungen

3.4.1 Durch mechanische Spannung induzierte Effekte

Für diesen Abschnitt werden verschiedene kommerzielle Si-Solarzellen verwendet. Es wird eine mechanische Spannung in den Zellen dadurch hervorgerufen, dass zwischen der Zelle und der Aufspannvorrichtung Al-Streifen oder -Plättchen mit einer Dicke von $50\ \mu\text{m}$ positioniert werden und die Vakuumanasugung eingeschaltet wird. Es werden Messungen der Photoimpedanz nach Abschnitt 3.3.2 mit dem RED-, IR- und SIR-Laser durchgeführt.

3.4.2 Durch Co-Feuern hervorgerufene Inhomogenitäten

Von benachbarten multikristallinen p-Si-Wafern ($12,5\ \text{cm} \times 12,5\ \text{cm}$, $300\ \mu\text{m}$ dick) werden Solarzellen in einem industrienahen ganzflächigen Al-BSF-Zellprozess hergestellt. Dieser beinhaltet isotropes Ätzen, Inlinediffusion ($45\ \Omega/\square$), PECVD-SiN als Antireflexschicht, Siebdruck von Vorder- (PV 145) und Rückseitenpasten (PV 322), Co-Feuern in einem infrarotem Banddurchlaufofen (5 Zonen, Centrotherm) und finale Kantenisolation [38, 46].

Für die meisten Prozessparameter wurden optimale Werte, welche in vorhergegangenen Durchläufen ermittelt wurden, ausgewählt. Die Analyse integraler I - V -Kennliniendaten von einem Satz aus 160 Solarzellen erlaubte die Bestimmung fundamentaler Parameter des

Feuertemperaturprofils, was auf einen möglichen Bereich von 840 °C bis 915 °C für die optimale Peaktemperatur T_p hindeutete (siehe Abb. 2.8). Die integralen I - V -Kennliniendaten ergaben ein optimales Temperatur-Zeit-Produkt (mit einer großen Unsicherheit) um die Peaktemperatur T_p von 870 °C und eine Bandgeschwindigkeit von 1800 mm/min. Zusätzlich wurde z. B. eine große Variation von Photostromverlusten beobachtet, deren Ursprung nicht klar war. Zur Klärung verschiedener offener Fragen wurden für die Untersuchung in diesem Abschnitt mehr als 40 Solarzellen produziert mit einer systematischen Variation des Temperatur-Zeit-Produkts unter Verwendung

1. einer festen Bandgeschwindigkeit von 1800 mm/min und einer Temperaturvariation zwischen 840 °C bis 915 °C,
2. einer festen Temperatur von 870 °C und einer Variation der Bandgeschwindigkeit von 1800 mm/min herunter zu 1500 mm/min,
3. einer festen Temperatur von 915 °C und einer Variation der Bandgeschwindigkeit von 1800 mm/min auf bis zu 2100 mm/min.

Es wurden jeweils zwei Zellen für diese drei Fabrikationsserien produziert, um den Informationsverlust, verursacht durch Zellbruch oder Ausreißer, zu reduzieren.

Es wurden Messungen des Serienwiderstandes nach Abschnitt 3.3.1 vorgenommen und Messungen der Photoimpedanz nach Abschnitt 3.3.2 mit dem RED-, IR- und SIR-Laser durchgeführt.

3.4.3 „Parasitic shunting“ bei Zellen mit Rückseitenpassivierung

Proben

Mehrere 150 μm dicke multikristalline Si-Wafer durchgehen eine industriearartige Zellprozessequenz [46] für das Zellkonzept, welches in Abb. 3.12 gezeigt ist. Nach Diffusion und PSG-Entfernung folgt ein Rückätzschritt des parasitären Emitters durch Entfernen von 3–6 μm Si von der Rückseite. Danach werden beide Seiten chemisch gereinigt und ARC-SiN auf der Vorderseite und das SiO/SiN-Schichtsystem auf der Rückseite deponiert durch PECVD. Die Kontaktlöcher im Schichtsystem werden durch einen photolithografischen Schritt mit anschließender Ätzung geöffnet. Mittels Siebdruck werden die geöffneten Löcher mit Al-Paste befüllt, so dass sich nach dem Co-Feuern ein ohmscher Kontakt und eine Oberflächenpassivierung mittels Al-BSF einstellt. Die Enddicke der Zelle nach den ganzen Ätz- und Reinigungsschritten beträgt ungefähr 120 μm .

Messungen

Für die Analyse wurde eine Serie von Messungen durchgeführt mit verschiedenen Laserwellenlängen, mit verschiedenen Bedingungen der globalen Beleuchtung (weiße Halogenlampen), mit verschiedenen Laserfokusfleckgrößen und mit unterschiedlicher Ortsauflösung. Auch Messungen im Standard-Modus wie in Abschnitt 3.3.1 beschrieben wurden durchgeführt.

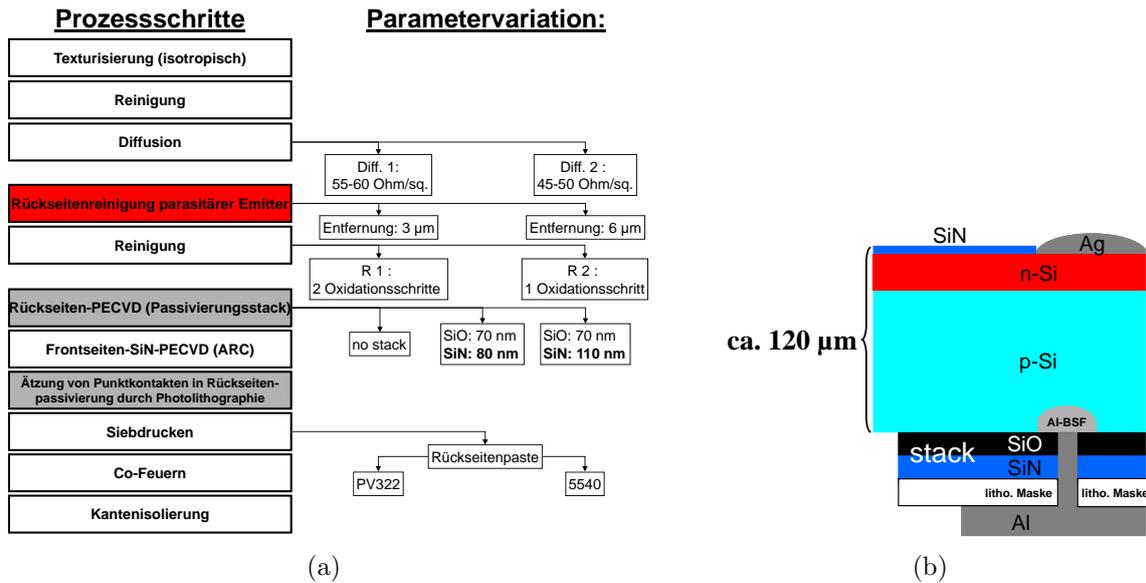


Abb. 3.12: (a): Zellprozesssequenz für eine $120 \mu\text{m}$ dicke Zelle mit Passivierungsstack auf der Rückseite. In Grau die Schritte, welche vom Standardindustrieprozess abweichen. Rechts: untersuchte Prozesseinstellungen. (b) Seitenansicht der finalen Zellstruktur an der Zellkante, welche die verschiedenen involvierten Schichten veranschaulicht.

3.4.4 Charakterisierung von Tandemsolarzellen

Probe

Eine Teststruktur einer a-Si/ μ -Si-Tandemsolarzelle, hergestellt beim Forschungslabor der Firma Bosch ($\eta = 10.5 \%$, $FF = 73.3 \%$, $U_{OC} = 1372 \text{ mV}$, $J_{SC} = 10.45 \text{ mA/cm}^2$), wird analysiert. Die Probe besteht aus einer oberen Teilzelle aus a-Si, welche für blaues Licht empfindlich ist, und einer unteren Teilzelle aus μ -Si, welche für infrarotes Licht empfindlich ist, und hat eine Zellfläche von 1 cm^2 .

CELLO-Messungen

Drei Sätze von Experimenten wurden durchgeführt, welche Kombinationen von zwei konfokalen Laserstrahlen (Blue 401 nm, IR 830 nm) im Standard-CELLO-Aufbau [47] verwenden.

Im ersten Satz von Experimenten wird der blaue Laser moduliert mit einer Frequenz von $\omega_a = 2\pi \times 6 \text{ kHz}$, während der konfokale IR Laser bei voller Intensität arbeitet, d. h. der nichtmodulierte IR Laser dient als Hintergrundbeleuchtung, welche die untere Teilzelle mit Ladungsträgern „flutet“ und somit eine „Standard“-LBIC-Messung des Photostroms der oberen Zelle ermöglicht. Die Laserbelegung ist „umgekehrt“ für die „Standard“-LBIC-Messung des Photostroms der unteren Zelle (IR-Laser moduliert, Blue-Laser volle Intensität).

In einem zweiten Satz von Experimenten wird der blaue (IR) Laser mit der Frequenz $\omega_a = 2\pi \times 6 \text{ kHz}$ moduliert während keine Hintergrundbeleuchtung existiert und somit kein Photostrom in der unteren (oberen) Teilzelle generiert wird. Somit limitiert „Current matching“ die Messungen des Photostroms.

In einem dritten Satz von Experimenten werden die Laser moduliert mit $\omega_a = 2\pi \times 6$ kHz und $\omega_b = 2\pi \times 10$ kHz, und mehrere Bilder werden simultan aufgenommen, wie in Abschnitt 2.4 beschrieben.

3.4.5 Untersuchungen zu PID und Regeneration bei Modulen

Modulproduktion, PID und Regeneration

Aus fünf industriefertigen multikristallinen Si-Solarzellen, welche aufgrund ihrer SiN-Abscheideparameter unter Verdacht stehen, PID zu begünstigen, werden Ein-Zell-Module gefertigt durch „stringen“ und Laminierung von EVA-Folie, Rückseitenfolie und Frontschutzglas. Diese Module werden degradiert und regeneriert. Potential-induzierte Degradation (PID) wurde erreicht, indem für 168 Stunden eine Spannung von 1000 V zwischen der mit Wasser benetzten Modulglasoberfläche und den negativen Anschlussbuchsen des Moduls angelegt wurde. Die Regeneration erfolgte auf gleicher Weise mit einer (negativen) Spannung von -1000 V.

Messungen

Für jeden Schritt (Zelle, Modul, Degradation, Regeneration) werden alle Solarzellen elektrisch mit der CELLO-Technik nach Abschnitt 3.3.1 mit Standardmessungen charakterisiert, um lokale Verluste der Zelleistung zu quantifizieren (ungefähr 100 Rasterbilder wurden hierfür aufgenommen). Für alle Messungen wurde eine Laserwellenlänge von 650 nm verwendet. Des Weiteren wurden globale I - V -Kennlinien bei einem Drittel Sonne aufgenommen und durch Kurvenanpassung die shunt-Widerstände aus diesen extrahiert.

Kapitel 4

Messergebnisse und Diskussion

4.1 Durch mechanische Spannung induzierte Effekte

Die Ergebnisse dieses Abschnitts wurden auf der 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference EUPVSEC 2011 in Hamburg veröffentlicht [47]. Von einer Expertenjury wurde der Inhalt für so wichtig erachtet, dass er im Rahmen eines Vortrags vor großem Fachpublikum präsentiert werden durfte.

4.1.1 Verbiegen einer Solarzelle

Abbildung 4.1 zeigt ein einfaches Experiment: Eine $180\ \mu\text{m}$ dicke Standard-mono-Si-Solarzelle liegt auf einer Standard-Vakuum-Aufspannvorrichtung. Ein $50\ \mu\text{m}$ dickes, rundes Aluminium-Plättchen wird zwischen Zelle und Aufspannvorrichtung platziert und das Vakuum angeschaltet, was für einen guten elektrischen Kontakt zwischen Zelle und Aufspannvorrichtung sorgt. Abbildung 4.1 a) (Seitenansicht) stellt schematisch Bereiche mit Druckspannung (rote Pfeile) und Zugspannungen (blaue Pfeile) dar. Abbildung 4.1 b) zeigt das Differenzbild zwischen einem Rasterbild der CELLO-Phasenverschiebung mit und ohne angelegtem Vakuum, welches stark darauf hinweist, dass darin solche Spannungsfelder visualisiert werden. Dies würde eine einfache und zerstörungsfreie mechanische Spannungsanalyse ermöglichen, und zwar an fertig prozessierten Solarzellen, was sonst nicht leicht möglich ist.

4.1.2 Qualitative Analyse

CELLO-Rasterbilder der Phasenverschiebung von Mono-Si-Solarzellen ($180\ \mu\text{m}$ Waferdicke) sind in Abb. 4.2 dargestellt unter Verwendung einer Laserlichtwellenlänge von (a) $650\ \text{nm}$, (b) $830\ \text{nm}$ und (c) $934\ \text{nm}$ bei $6\ \text{kHz}$. Ein Al-Streifen wurde zwischen die Cu-Rückseitenelektrode (Aufspannvorrichtung) und die Solarzelle gelegt, wie durch die violette Linie aufgezeigt ist. Der Al-Streifen ist nicht sichtbar bei $650\ \text{nm}$, leicht sichtbar bei $830\ \text{nm}$ und sehr klar sichtbar bei $934\ \text{nm}$. Ohne Al-Streifen zeigt der markierte Bereich keine markante Abweichung. Eine große Anzahl an Tests wurde durchgeführt, um auszuschließen, dass andere künstliche Effekte bezüglich des Al-Streifens gemessen wurden: z. B. konnten reine geometrische Effekte wie die Änderung der Winkelabhängigkeit des einstrahlenden Laserstrahls, Änderungen des Reflexionsvermögens der Zellrückseite oder

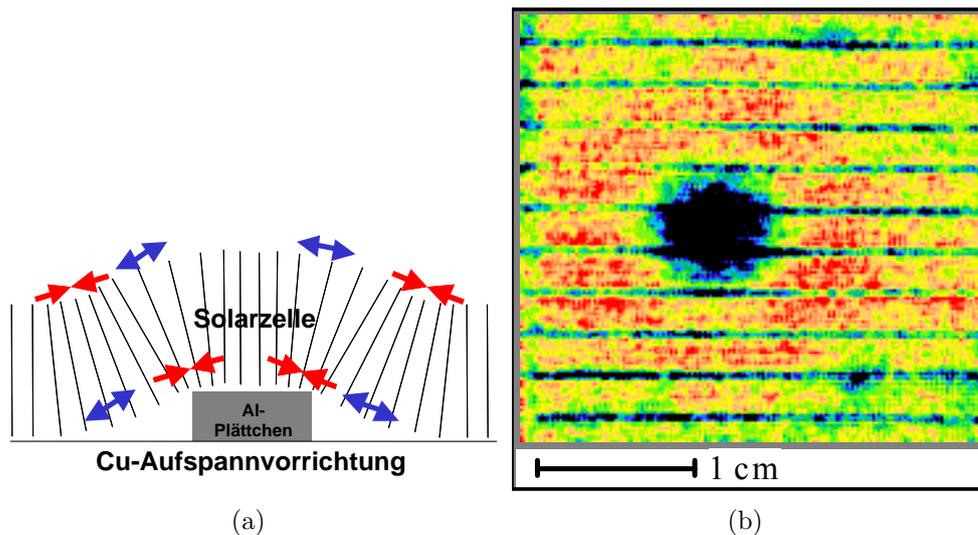


Abb. 4.1: a) Seitenansicht: Al-Plättchen (grau), positioniert zwischen Solarzelle und Vakuumaufspannvorrichtung (mehr Details im Text). b) Rasterbild von entsprechender Zugspannung (blau) und Druckspannung (rot), extrahiert von CELLO-Messungen.

eine Änderung des lokalen elektrischen Kontakts ausgeschlossen werden. Ähnlich wie in Abb. 4.1 b) ist der zentrale Bereich mit erhöhter Phasenverschiebung umgeben von einem Bereich mit niedriger Phasenverschiebung, was darauf hindeutet, dass Bereiche mit Zug- und Druckspannung sichtbar sind. Die Eindringtiefen der drei Laser sind ungefähr $3\ \mu\text{m}$, $15\ \mu\text{m}$, $55\ \mu\text{m}$; ein näherer Blick auf die quantitativen Werte der Phasenverschiebung zeigt, dass die Änderung durch den Al-Streifen viel stärker ist als eine lineare Abhängigkeit mit der Eindringtiefe, was ein starker Hinweis darauf ist, dass die Änderung der Phasenverschiebung nicht durch mechanische Spannungen induzierten Änderungen der Mobilität beherrscht wird.

Abbildung 4.3 a) und Abb. 4.3 b) zeigen das Rasterbild der Amplitude und der Phasenverschiebung von derselben Solarzelle wie in Abb. 4.2 ohne Al-Streifen und um 180° gedreht. Die gleichen charakteristischen Bereiche mit großer und kleiner Phasenverschiebung sind sichtbar. Deutlich schwächer, aber dennoch signifikant, sind die mechanisch gestressten Bereiche in dem Amplitudenbild, vor allem im SIR-Laser, sichtbar (Kreise in Abb. 4.3 a) und Abb. 4.3 b)). Die zwei Kreise markieren Flächen mit signifikanten Stromverlusten. Die Bilder der Phasenverschiebung zeigen eine stark erhöhte Phasenverschiebung beim linken Kreis und eine stark reduzierte Phasenverschiebung beim rechten Kreis. Nach Gl. (2.12) führt eine reduzierte Lebensdauer zu einer reduzierten Amplitude und einer reduzierten Phasenverschiebung in der Kurzschlussstromantwort. Deshalb findet man meistens diese Korrelation. Die inverse Korrelation von einer reduzierten Amplitude und einer erhöhten Phasenverschiebung wird hingegen selten gefunden, besonders bei Mono-Si-Solarzellen.

Der Al-Streifen auf der Rückseite der Solarzelle führt bei Vakuumansaugung zu einer Verformung der Solarzelle. Darüber hinaus könnte sich auch der ohmsche Kontakt auf der Rückseite oder das Reflexionsvermögen der Rückseite lokal ändern. Die Verformung der Solarzelle führt zu unterschiedlichen Einfallswinkeln für das Laserlicht, was zu veränderter lokaler Absorption und effektiv erhöhten Eindringtiefen führen könnte. Durch eine Reihe

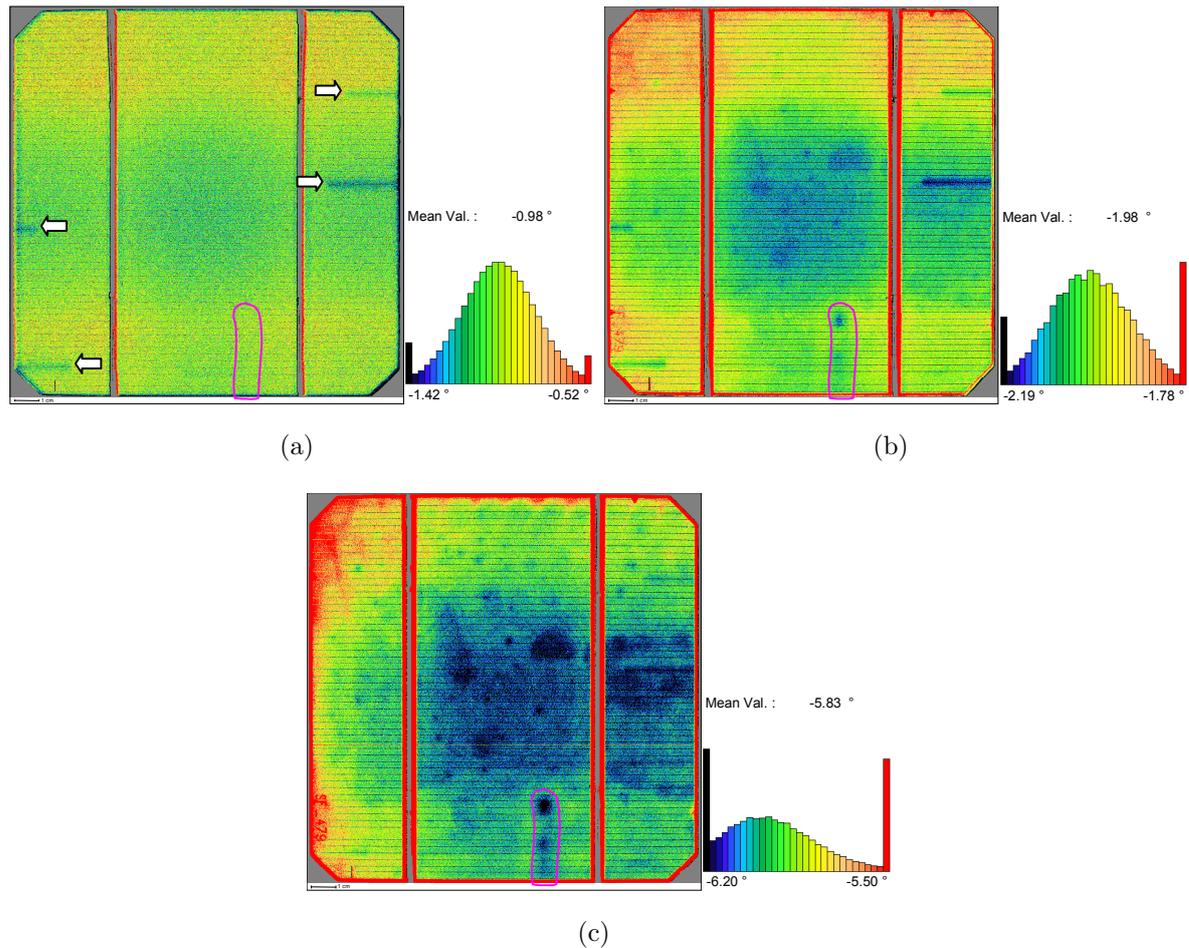


Abb. 4.2: Abhängigkeit der Phasenverschiebung von der Wellenlänge des Lasers. a) 650 nm, b) 830 nm, c) 934 nm. Die violette Linie weist auf die Position eines 50 μm dicken Al-Streifens hin, welcher zwischen Solarzelle und Cu-Rückseitenelektrode gelegt wurde. Erhöhte Serienwiderstände sind klar an gebrochenen Gridfingern zu erkennen in a). Da keine erhöhte Phasenverschiebung in Abb. a) in der markierten Fläche des Al-Streifens sichtbar ist, können ohmsche Verluste für die in b) und c) sichtbaren Effekte ausgeschlossen werden.

von Vorexperimenten (z. B. eine CELLO-Messung mit global verkippter Solarzelle) und mit theoretischen Abschätzungen konnten alle diese Erklärungsversuche ausgeschlossen werden, da sie für die beobachteten Effekte vor allem in der Phasenverschiebung meist um eine Größenordnung zu gering sind. Darüber hinaus lassen sich die experimentellen Befunde sehr gut quantitativ durch eine lokale Änderung der Bandlücke, hervorgerufen durch eine lokale Änderung der Gitterkonstanten, beschreiben, wie in den nachfolgenden Abschnitten diskutiert wird, weshalb wenig Zweifel bestehen, dass die an den Rändern der Al-Streifen und an der Solarzelle beobachteten Effekte die mechanische Verspannung widerspiegeln.

4.1.3 Quantitative Analyse

Wie im Theorieteil in Abschnitt 2.3 und im Experimentaltel in Abschnitt 3.3.2 beschrieben, werden für die komplette CELLO-Impedanzanalyse die Daten (nicht alle sind hier gezeigt) von 12 Amplituden- und 12 Phasenverschiebungsrasterbildern bei 4 verschiedenen Frequenzen und 3 verschiedenen Laserwellenlängen λ benutzt. Für die Kurvenanpassung wurden eine konstante Waferdicke von $180 \mu\text{m}$ (Ergebnis aus Messungen mit dem USB-gesteuerten Kamera-Mikroskop) und eine Diffusionskonstante D von $35 \text{ cm}^2/\text{s}$, was ein Standardwert für Mono-Si-Material ist, verwendet. Die Parameter E_{ph} , A in Gl. (2.14) wurden auch konstant gehalten, so dass τ , S_{b} , RC und E_{g} die Fitparameter sind. Tatsächlich wurde ein Skalenfaktor x als Fitparameter eingeführt, welcher die relative Änderung der Bandlücke bezogen auf den nicht mechanisch verspannten Fall beschreibt:

$$x = \frac{E_{\text{g}} - E_{\text{g},0}}{E_{\text{g},0}}. \quad (4.1)$$

Abbildung 4.3 c) bis f) zeigen die Bilder der lokalen Fitparameter. Bevor Effekte, hervorgerufen durch mechanische Spannung im Detail besprochen werden, werden die übrigen Fitparameter diskutiert. Wie für Mono-Si-Zellen zu erwarten, ist die Variation in der Volumenlebensdauer in Abb. 4.3 c) unbedeutend. Das Rasterbild der RC -Verzögerungszeit wird von der Änderung des lateralen Serienwiderstands dominiert. Eine Vierfachsymmetrie, die die Position der Kontaktelektroden widerspiegelt, ist genauso klar zu erkennen wie durchbrochene Gridfinger. Diese durchbrochenen Gridfinger sind schon als charakteristisches Merkmal im Bild der Phasenverschiebung in Abb. 4.2 a) sichtbar. Abb. 4.3 e) zeigt das Ergebnis des Fits für die Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit für die Rückseite der Zelle. Hier ist die systematische starke Erhöhung bei den Flächen mit fehlendem BSF unter den „Mainbusbars“ und um die Kanten der Solarzelle sehr gut zu erkennen. Prozessinduzierte Effekte am unteren Rand der Zelle, hervorgerufen durch die Abschattung durch das Förderband (Sinterofen), sind auch gut sichtbar. Die rechte Seite der Zelle zeigt ein signifikant erhöhtes S_{b} . Die meisten Merkmale, sichtbar als rote Fläche mit reduzierter Phasenverschiebung in Abb. 4.3 b), lassen sich, wie erwartet, Rekombinationsverlusten auf der Rückseite zuordnen.

Abb. 4.3 f) zeigt die Fitergebnisse für die relative Änderung der Bandlücke. Alle Bereiche mit stark erhöhter Phasenverschiebung in Abb. 4.3 b) sind in diesem Bild sichtbar. Ohne die Berücksichtigung von mechanischen Spannungen, wie durch Gl. (2.14) beschrieben (d. h. es werden nur die Standardfitparameter verwendet), zeigt keines der anderen Bilder konsistente Ergebnisse. Ein zweiter Versuch mit D als lokalem Fitparameter, was z. B. notwendig ist, um für UMG-Si-Solarzellen korrekte Ergebnisse zu erzielen [32], brachte für diese Mono-Zelle keine konsistenten Ergebnisse. Dies ist ein starker Hinweis darauf, dass Gl. (2.14) die richtige (und notwendige) Beschreibung der Effekte von mechanischer Spannung auf die Kurzschlussströme ist.

4.1.4 Einfluss der Vakuumaufspannvorrichtung

Nicht zuletzt wurden die Messungen von Abb. 4.1 b) mit der ganzen Solarzelle wiederholt, aber diesmal ohne zusätzlichen Al-Streifen oder -Plättchen. Zwei Rasterbilder der CELLO-Phasenverschiebung mit dem 940 nm -Laser bei 6 kHz werden aufgenommen: einmal mit eingeschaltetem Vakuum (erstes Bild) und einmal ohne Vakuum (zweites Bild).

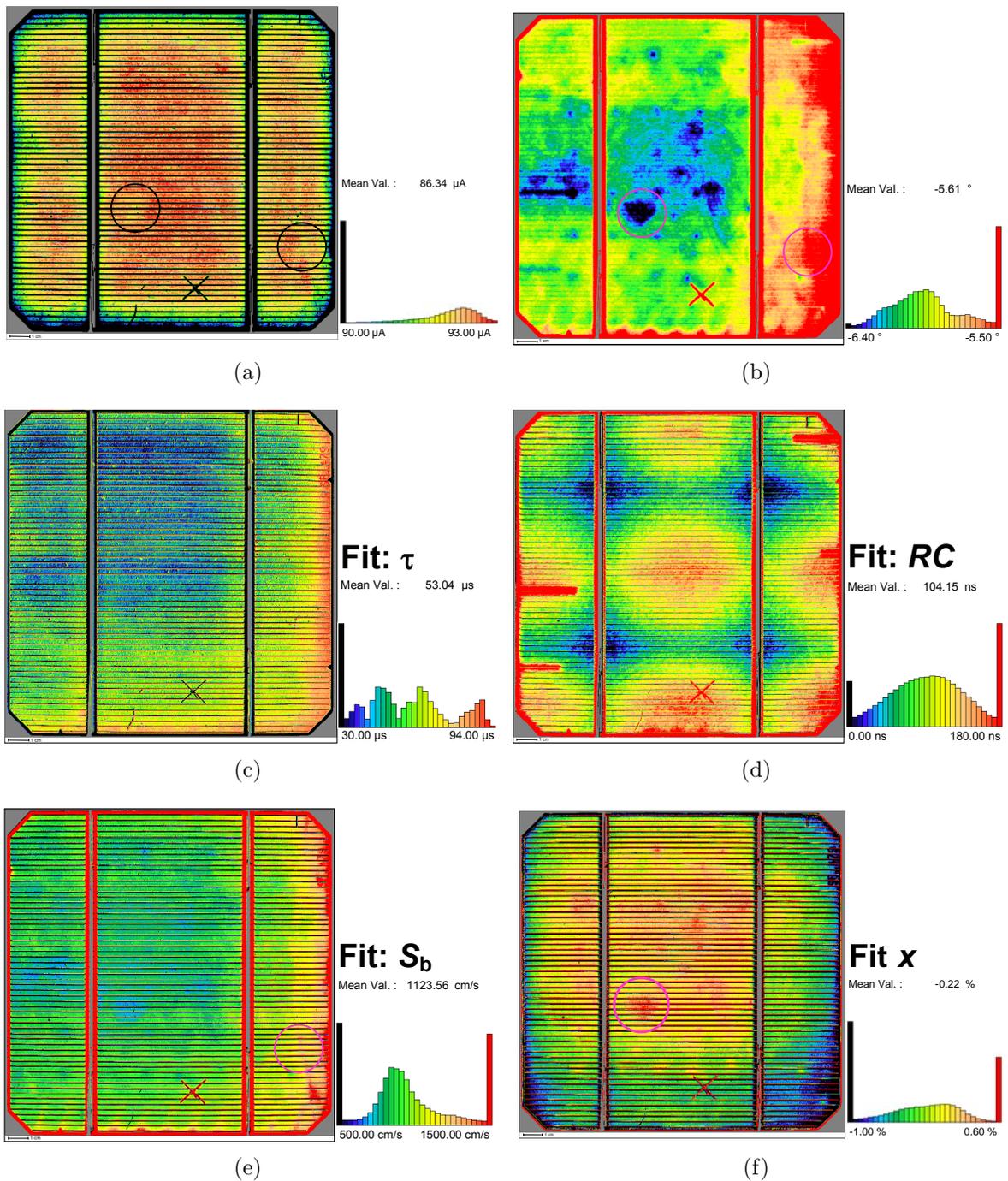


Abb. 4.3: CELLO-Messwerte des SIR-Lasers (934 nm): a) Amplitude, b) Phasenverschiebung. Fitergebnisse: c) τ , d) RC , e) S_b , f) x (siehe Gl. (4.1)).

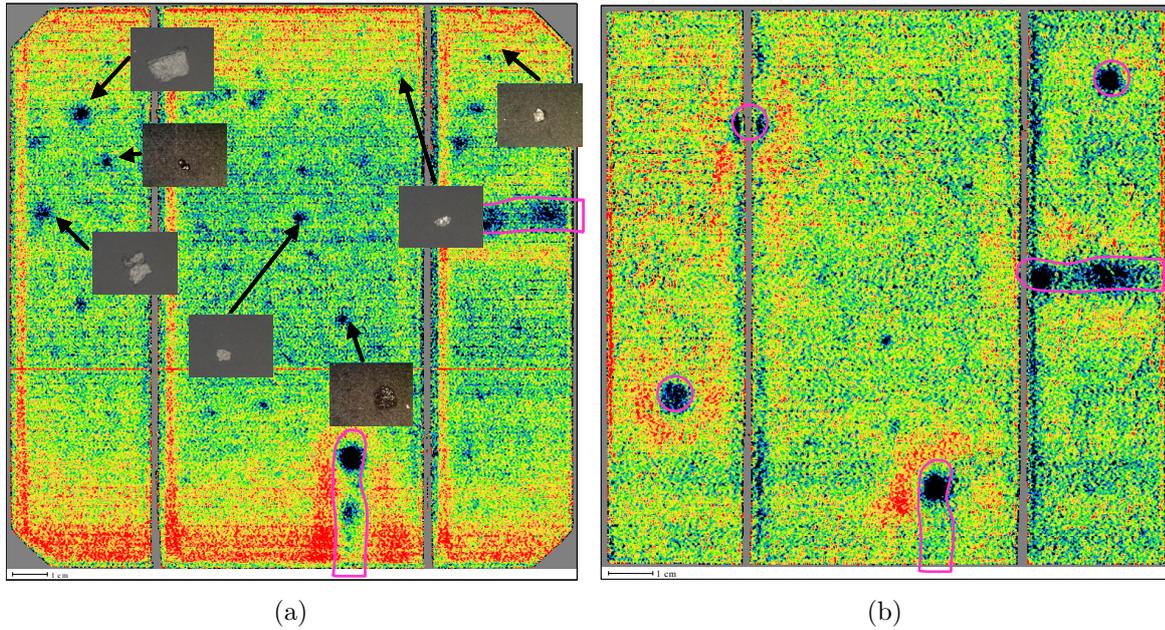


Abb. 4.4: a): Unterschied in der Phasenverschiebung mit / ohne Vakuum an der Aufspannvorrichtung. Zwei Al-Streifen sind zwischen Zelle und Cu-Rückseitenkontakt (Aufspannvorrichtung) positioniert (violette Linie). b): Multi-Si-Solarzelle 230 μm dick: Unterschied in der Phasenverschiebung mit / ohne Vakuum an der Aufspannvorrichtung. Zwei Al-Streifen (violette Linie) und mehrere Al-Plättchen (violette Kreise) sind zwischen der Zelle und dem Cu-Rückseitenkontakt positioniert.

Da die Frontseitenelektroden die Solarzelle ausreichend gut auf die Aufspannvorrichtung drücken, wurden keine Änderungen der elektrischen Kontaktierung und der Kühlung beobachtet. Das Differenzbild zwischen beiden Phasenverschiebungen zeigt mehrere dunkle Bereiche mit erhöhter Differenz der Phasenverschiebung (siehe Abb. 4.4 a)). Jeder dieser Punkte konnte Partikeln auf der Zellrückseite zugeordnet werden, wie durch die eingefügten Bilder gezeigt ist. Dieser „Differenz-Modus“ ist nur empfindlich auf extrinsische, d. h. durch Anlegen des Vakuums induzierte mechanische Spannung. Da für die Messungen in Abb. 4.2 und Abb. 4.3 das Vakuum eingeschaltet worden ist, findet man viele Punkte in Abb. 4.4 a) wieder, während die großen Bereiche mit erhöhter Phasenverschiebung (Abb. 4.3 b) linker Kreis) nicht vom angeschalteten Vakuum beeinflusst worden sind. Solche Messungen wurden für diese Zelle mehrere Male innerhalb eines Jahres wiederholt. Keine Entspannung der intrinsischen Spannung wurde beobachtet. Dieselbe Prozedur der Phasenverschiebungsdifferenz wurde mit Al-Streifen und -Plättchen (50 μm Dicke) bei verschiedenen Solarzellentypen aus verschiedenen Si-Materialien und -Dicken getestet. Die Effekte der Zug- und Druckspannung ähnlich zu Abb. 4.1 b) wurden für alle getesteten Zellen bis zu einer Dicke von 230 μm gefunden, wobei sie am stärksten bei Mono-Si-Solarzellen und bei dünneren Zellen ausgeprägt waren. Abb. 4.4 b) zeigt als Beispiel eine 230 μm dicke mc-Si-Solarzelle.

4.1.5 Resultierende Verbesserungen des CELLO-Messaufbaus

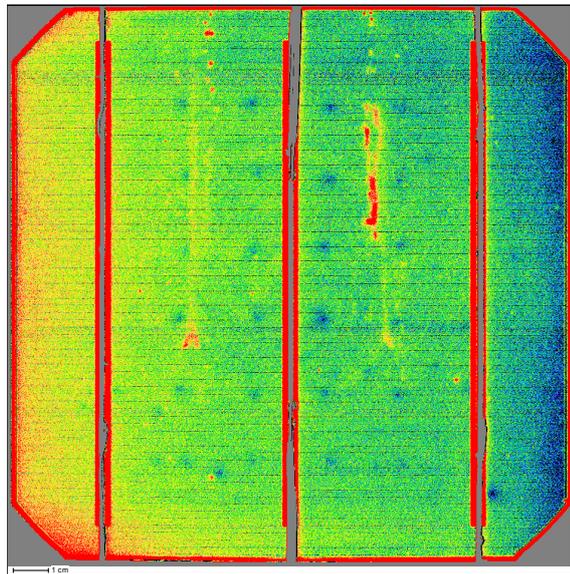
Diese Befunde halfen dabei, den CELLO-Messaufbau zu verbessern. Abb. 4.5 a) zeigt das Bild der Phasenverschiebung des SIR-Lasers von einer Mono-Si-Solarzelle. Ein regelmäßiges Muster blauer Kreise, welches mit der Position der Vakuumlöcher der Cu-Aufspannvorrichtung übereinstimmt (vgl. Abb. 4.5 b)), ist zu sehen. Nach Entgraten der Vakuumlöcher, wie in Abb. 4.5 d) gezeigt, verschwindet das regelmäßige Muster blauer Kreise (siehe Abb. 4.5 c)). Folglich handelt es sich bei dem Muster blauer Kreise um ein Messartefakt der Cu-Aufspannvorrichtung, bei dem der mit dem Auge nicht sichtbare Grat an den Vakuumlöchern zu extrinsischer Spannung führt, welche in der Phasenverschiebung sichtbar wird. Als Folge von diesen Messungen wurde die nochmalige Entgratung aller CELLO-Aufspannvorrichtungen vorgenommen. So führte das Verständnis der Effekte der mechanischen Verspannung zu einer permanenten Verbesserung der CELLO-Messung.

4.1.6 Fazit

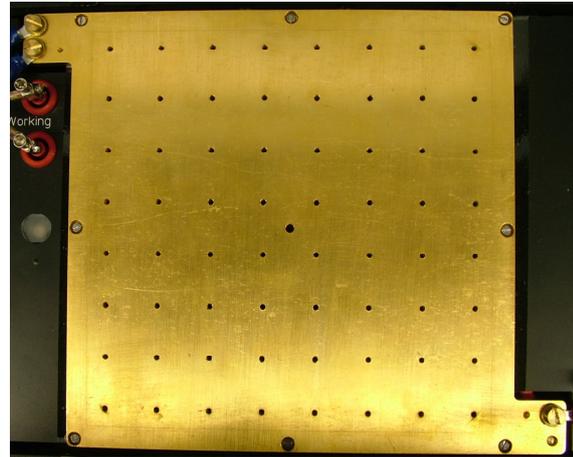
Von mechanischer Spannung induzierte Effekte müssen für infrarote Wellenlängen mit berücksichtigt werden. Stark ausgeprägt sind diese bei

- dünnen Solarzellen
- Multi- und Mono-Material.

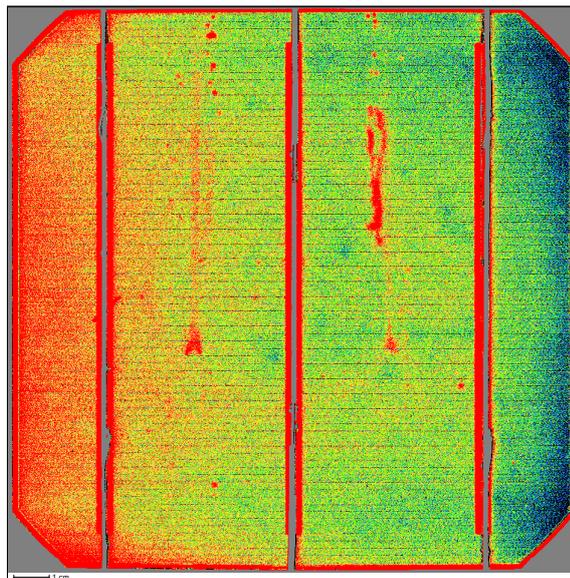
Die CELLO-Impedanzanalyse trennt Spannungseffekte von anderen Solarzellenparametern wie Mobilität und Lebensdauer. Diese Ergebnisse zeigen, dass mechanische Spannungen nicht nur ein Problem bei einer erhöhten Zellbruchrate sind, sondern auch die Infrarotantwort verändern können. Als Folge dieser Befunde wird bei jeder CELLO-Photoimpedanzanalyse auf Effekte mechanischer Spannung geprüft. Allerdings verhalten sich meistens die Zellen wie normale Solarzellen ohne Effekte mechanischer Spannung.



(a)



(b)



(c)



(d)

Abb. 4.5: a) Bild der Phasenverschiebung des SIR-Lasers, zeigt blaue Punkte an Positionen der Vakuumlöcher der Cu-Aufspannvorrichtung, wie in b) gezeigt. c) Die blauen Punkte sind nicht mehr sichtbar, nachdem die Vakuumlöcher entgratet wurden. d) Nahaufnahme eines Vakuumlochs nach der Entgratung.

4.2 Durch Co-Feuern induzierte Inhomogenitäten von konventionellen Si-Solarzellen

Die Ergebnisse dieses Abschnitts sind das Ergebnis einer Zusammenarbeit mit dem Labor- und Servicecenter Gelsenkirchen des Fraunhofer ISE und wurden auf der 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference EUPVSEC 2013 in Paris veröffentlicht [48].

4.2.1 Messstrategie

In Kooperation mit dem Labor- und Servicecenter Gelsenkirchen des Fraunhofer ISE wurden Feuerschritte optimiert. Dazu wurden ungefähr 300 Solarzellen mit einem Standard Industrieprozess, wie in Abschnitt 2.7 beschrieben, hergestellt. An einer relevanten Untermenge dieser Solarzellen wurden detaillierte CELLO-Untersuchungen durchgeführt. Um die Zahl an Zellen zu reduzieren, welche benötigt werden, um statistisch relevante Informationen über die Abhängigkeit des Co-Feuerprozesses auf den Wirkungsgrad zu erhalten, wurde ein dreistufiger Ansatz gewählt. Die Zahl der Zellen reduziert sich von 34 auf 30, wenn offensichtliche Risse und Ausreißer, identifiziert durch integrale I - V -Kennliniendaten, berücksichtigt werden. An diesen 30 Zellen werden schnelle CELLO-Serienwiderstands- und Photostrommessungen durchgeführt, wie in Abschnitt 3.3.1 und Abschnitt 3.3.2 beschrieben. Dies schließt 6 Ausreißer aus, z. B. mit kleinen Rissen, hervorgerufen durch die Handhabung oder durch andere Abweichungen, welche nicht in Beziehung zu den variierten Parametern stehen. Für die restlichen 24 Zellen wurde eine detaillierte Photoimpedanzanalyse nach Abschnitt 3.3.2 durchgeführt, was die Berechnung von Bildern sekundärer Parameter, wie z. B. von Bildern der Volumenlebensdauer, Oberflächenrekombination auf der Rückseite und des Serienwiderstandes, ermöglichte. Im Anhang wird exemplarisch für eine Auswahl an Zellen die Auswertung dargestellt: Erste Voruntersuchungen wie in Abb. B.1 und Abb. B.2 liefern erste Hinweise auf Serienwiderstandsprobleme und Einflüsse der Reflektivität. Diese Voruntersuchungen helfen dabei, die richtige Modellfunktion für die für den Fit der Daten notwendige Anzahl an Modellparameter zu finden. Dem folgen im Anhang die Fitergebnisse für eine Modellfunktion („SRC3x3“) mit drei RC -Gliedern, drei Amplituden und S_b , gezeigt von Abb. B.3 bis Abb. B.9. Diese Modellfunktion eignete sich besonders für die Extraktion von S_b . Darauf folgen die Fitergebnisse für eine andere Modellfunktion („tSRC1“) von Abb. B.10 bis Abb. B.16, wofür nur die Datensätze des RED-Lasers verwendet wurden und welche für die Extraktion von τ_{lifc} geeignet waren.

4.2.2 R_{SER} und $R_{\text{SER}}C$ -Zeitkonstanten

Ähnliche Ergebnisse (hier aus Platzgründen nicht gezeigt) wurden für ein konstantes T_p bei 870°C und variierten Bandgeschwindigkeiten erhalten. Die Reduktion der Bandgeschwindigkeit unter 1700 mm/min , d. h. die Erhöhung der Zeit im Ofen, reduzierte leicht den ohmschen Widerstand des Vorderseitenkontakts, aber die Qualität der lokalen Diode, besonders in Flächen mit hoher Versetzungsdichte, wurde signifikant schlechter.

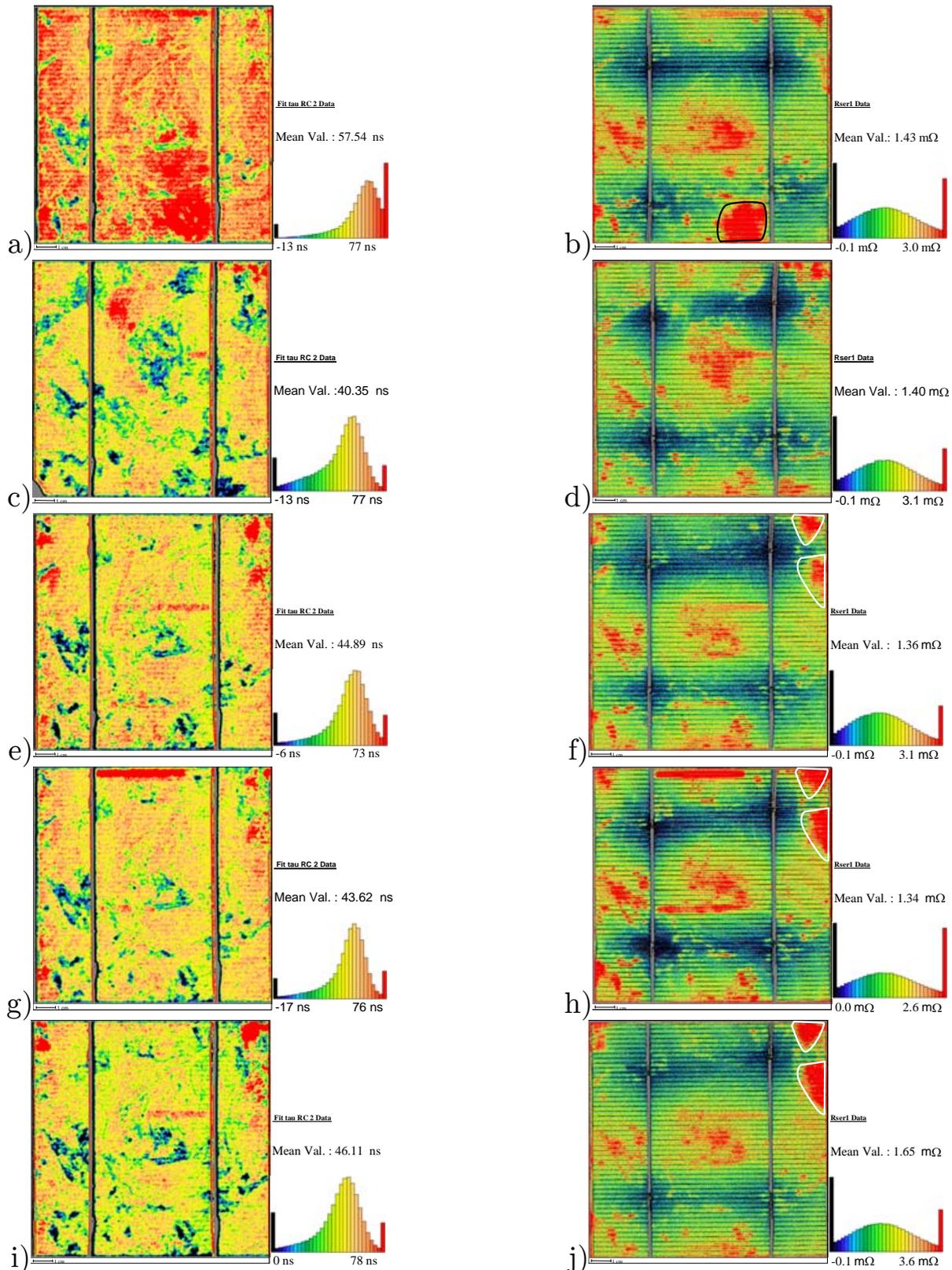


Abb. 4.6: Fit von $R_{SER}C$ -Zeitkonstanten (links) und des konventionellen (direkt gemessenen) CELLO-Serienwiderstandes (rechts) von Nachbarzellen für eine feste Bandgeschwindigkeit von 1800 mm/min und verschiedenen T_p : a) und b) bei 855 °C, c) und d) bei 870 °C, e) und f) bei 885 °C, g) und h) bei 900 °C und i) und j) bei 915 °C. Typische unterfeuerte (schwarz) und überfeuerte (weiß) Flächen sind markiert.

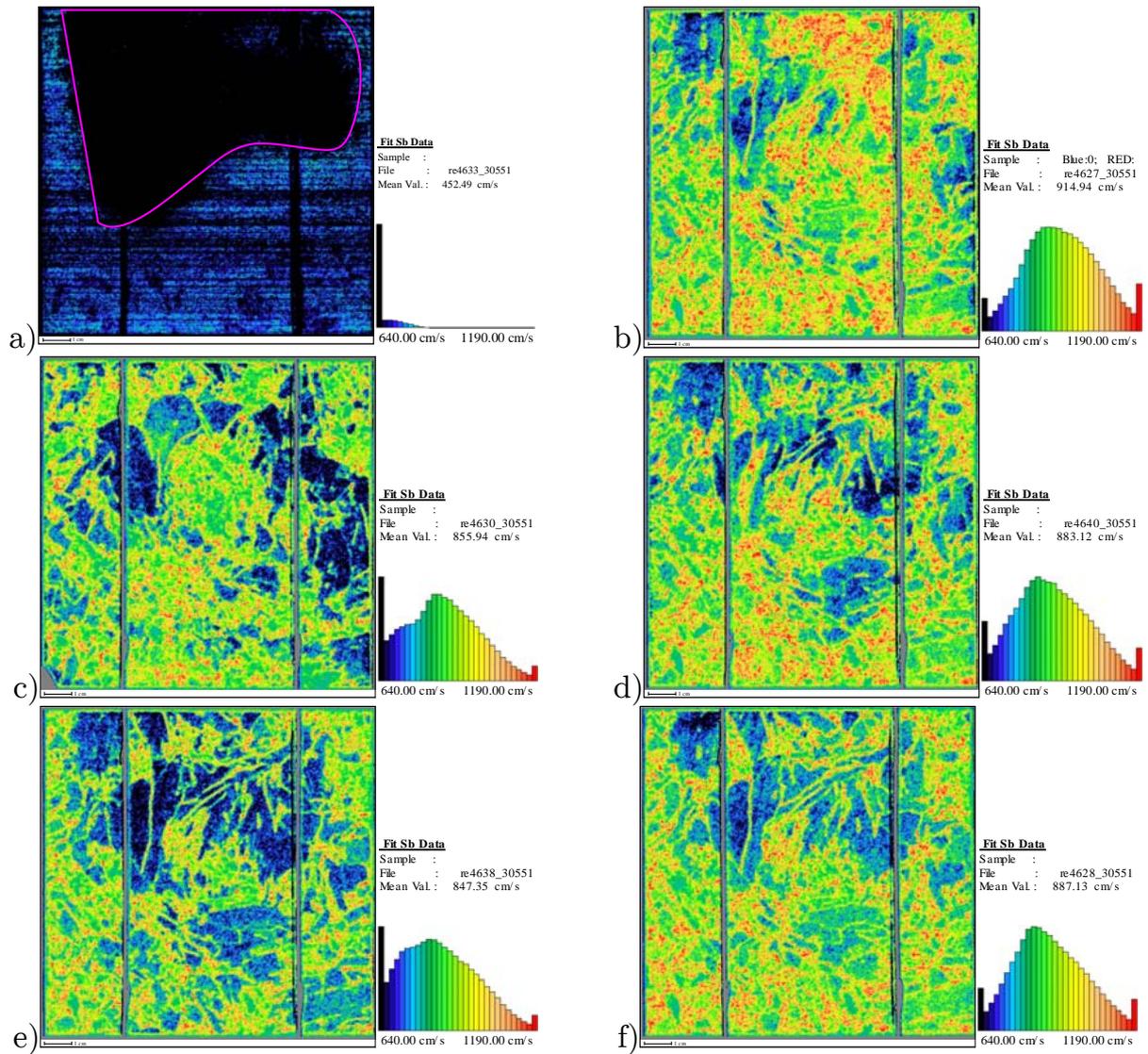


Abb. 4.7: S_b -Bilder von Nachbarzellen für eine feste Bandgeschwindigkeit von 1800 mm/min und variiertes T_p : a) 840 °C, b) 855 °C, c) 870 °C, d) 885 °C, e) 900 °C und f) 915 °C.

4.2.3 Rekombinationsverluste

Während für die Serienwiderstände zumindest einige Informationen über die optimale Feuertemperatur aus den integralen Daten extrahiert werden konnten, was einen Konsistenztest für die hier präsentierten CELLO-Ergebnisse ermöglichte, war dies für die Rekombinationsverluste nicht möglich. Ein Hauptgrund dafür liegt in der Tatsache, dass für die integralen Werte der Rückseitenrekombinationsgeschwindigkeit außer der CELLO-Messtechnik keine zuverlässigen Messmethoden existieren. So kann nicht anhand der integralen I - V -Kennliniendaten unterschieden werden, ob die starken Variationen der Rekombinationsverluste in Beziehung zur Volumen- (indirekt durch Änderung der Bedingungen für die Wasserstoffpassivierung) oder zur Oberflächenrekombination (direkt durch die Feuerbedingungen des Al-BSFs) stehen.

Abbildung 4.7 zeigt eine Auswahl an S_b -Bildern der Messserie mit konstanter Bandgeschwindigkeit (wie in Abb. 4.6). Das 840 °C-Bild in Abb. 4.7 a) hat den kleinsten Mittelwert, ungefähr 600 cm/s (nicht berücksichtigt ist das durch die violette Linie markierte R_{SER} -Artefakt), und ist sehr homogen. Im Gegensatz dazu haben alle anderen Bilder Mittelwerte von ungefähr 900 cm/s und zeigen eine sehr starke Variation innerhalb des Bildes. Die Bilder der Volumenlebensdauer (nähere Infos im Anhang) waren ziemlich homogen mit nur einer leichten Variation des Mittelwerts. Folglich zeigen diese Ergebnisse klar, dass die starken Variationen, welche in der Analyse der I - V -Kennlinie gefunden wurden, (nur) in Bezug zu verschiedenen Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeiten auf der Rückseite der Zelle stehen. Zweitens ist die optimale Feuertemperatur bezüglich S_b ungefähr 840 °C, was signifikant unter der optimalen Temperatur von 870 °C für R_{SER} liegt. Bei 840 °C ist der Vorderseitenkontakt deutlich unterfeuert, was zu dem R_{SER} -Artefakt im oberen Teil des Bildes führt. Tatsächlich stimmt diese Fläche sogar mit der Fläche markiert von der violetten Linie in Abb. 4.6 a), überein (einfach das Bild um 180 ° drehen), was somit den typischen Fingerabdruck des Ofens für unterfeuerte Zellen darstellt. In diesem Abschnitt wurden für eine leichte Erkennung der materialinduzierten Defekte alle Bilder von benachbarten Zellen so orientiert, dass die sich entsprechende Kornstruktur zu erkennen ist.

4.2.4 Co-Feueroptimierung

Die Temperaturabhängigkeit von S_b kann sehr gut verstanden werden durch die sog. Al-Si-Agglomeration [49], d. h. inhomogene BSF-Dicke aufgrund von Inselwachstum, das typischerweise für $T_p < 850$ °C beobachtet wird bei Verwendung dicker Al-Rückseitenpasten.

Die Optimierung des Zellprozesses bedeutet, gleichzeitig S_b und R_{SER} zu optimieren, d. h. die Feuerbedingungen so zu modifizieren, dass kleinste Mittelwerte und kleinste Variationen innerhalb der Bilder für S_b und R_{SER} zu finden sind. Wahrscheinlich besteht also die beste Strategie darin, die kritische Temperatur für Al-Si-Agglomeration zu erhöhen durch Verringerung der Dicke der gedruckten Al-Rückseitenpaste oder durch Verwendung einer Al-Rückseitenpaste mit einem höheren Si-Gehalt, zu Details siehe [49].

Wie dieses Beispiel zeigt, benötigt besonders die Prozessoptimierung von mc-Si-Solarzellen eine lokale Analyse aller relevanten Zellparameter, weil hauptsächlich die starke laterale Variation verschiedener wirkungsgradbestimmender Parameter das Hauptproblem von mc-Si-Solarzellen ist. Besonders der Serienwiderstand des Frontkontaktes und die Oberflächenrekombination, induziert vom BSF, hängen stark von der Kornorientierung

ab.

Zusätzlich erlaubt die Position, Größe und Form von Flächen mit z. B. sehr schlechtem Kontaktwiderstand eine Charakterisierung von Mechanismen, welche zu Verlusten bei nicht optimalem T_p führen. Im hier gezeigten Beispiel haben unterfeuerte Zellen Flächen mit schlechtem Kontaktwiderstand, welche klar mit dem Ofen in Verbindung gebracht werden können (d. h. sie sind prozessinduziert), während überfeuerte Zellen Widerstandsverluste bei bestimmten Körnern aufweisen (d. h. materialinduziert). Um solche materialinduzierten Effekte identifizieren zu können, war die Prozessierung von Wafern, die benachbart sind, bzw. deren relative Lage im Block bekannt ist, sehr wichtig.

4.2.5 Fazit

Dieser Abschnitt zeigt den klaren Vorteil bei der Verwendung orts aufgelöster Daten für die Optimierung des Solarzellenprozesses in Vergleich zu integralen Messdaten, wie I - V -Kennlinien. Nicht nur die Mittelwerte von S_b - und R_{SER} -Bildern, sondern besonders die Abweichung innerhalb der Bilder und der Flächenanteil mit „schlechten“ lokalen Eigenschaften erlauben eine klare Klassifikation z. B. der Kontaktqualität und der BSF-Bildung als Funktion der Co-Feuerparameter.

4.3 Charakterisierung rückseitig passivierter Zellen mit „Parasitic shunting“

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Ergebnisse sind das Resultat einer Zusammenarbeit mit dem Labor- und Servicecenter Gelsenkirchen des Fraunhofer ISE und wurden bereits auf der 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference EUPVSEC 2012 in Frankfurt veröffentlicht [50].

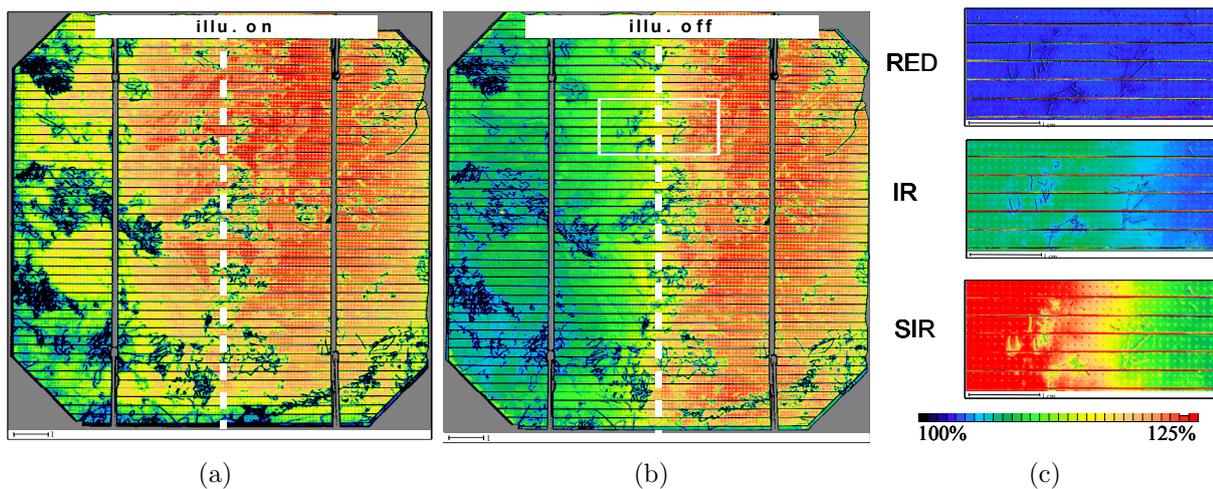


Abb. 4.8: dI_{SC} -Amplituden-Bilder des SIR-Lasers mit a) 1/3 Sonne Beleuchtung (d. h. „illu. on“) und b) 0 Sonne Beleuchtung (d. h. „illu. off“). Hohe Werte in den Bildern sind rot dargestellt, Verluste im Photostrom sind in b) sichtbar, d. h. bei der linken Hälfte in b) handelt es sich um Bereiche mit starken Photostromverlusten; c) Amplitudenverhältnissbild (d. h. illu. on/off) mit gleicher Skalierung für unterschiedliche Laserwellenlängen für die in b) markierte Fläche. Sie zeigen, dass die Verluste auf der linken Zellseite mit größerer Laserwellenlänge stärker werden.

4.3.1 Photostromverluste aufgrund von „Parasitic shunting“

Der CELLO-Aufbau ermöglicht die Regelung der globalen Beleuchtungsintensität, wobei weißes Licht zwischen 1/3 Sonne (Abkürzung: „illu. on“) und 0 Sonnen (Abkürzung: „illu. off“) verwendet wird. Die Ergebnisse in Abb. 4.8 wurden aus dI_{SC} -Messungen mit 1/3 und 0 Sonnen der globalen Beleuchtung und Laser-Licht bei verschiedenen Wellenlängen gewonnen. Das SIR-Laser-Rasterbild (934 nm) von 0 Sonnen in Abb. 4.8 b) zeigt im Vergleich zu dem 1/3-Sonnen-Bild in Abb. 4.8 a) starke Verluste auf der linken Zellseite. Diese Verluste sind nur sichtbar, wenn die globale Beleuchtung ausgeschaltet ist.

Als Ursache der in Abb. 4.8 b) sichtbaren Photostromverluste kommen mehrere lokale Verlustmechanismen in Frage, wie z. B. lokal erhöhte Volumen- oder Grenzflächenrekombination oder lokale Kurzschlüsse. Wie die nachfolgende Diskussion zeigt, handelt es sich dabei jedoch um „Parasitic shunting“, dessen Eigenschaften schon in Abschnitt 2.6 beschrieben worden sind.

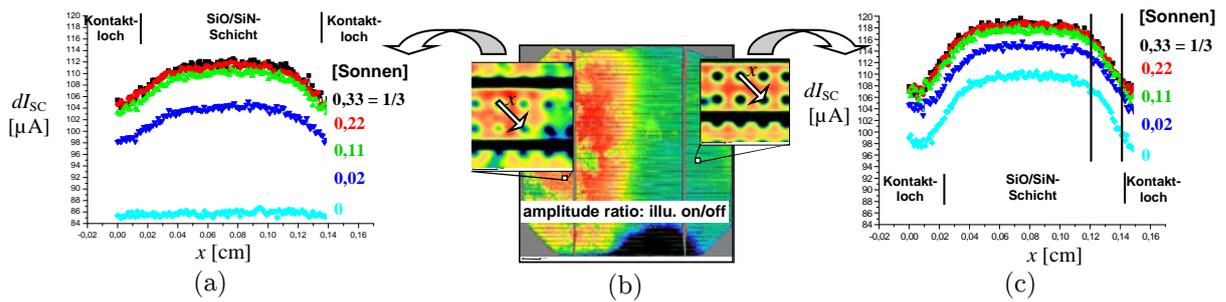


Abb. 4.9: Linienscan zwischen zwei Kontaktlöchern mit einer hohen Ortsauflösung (120 pixel/mm) mit den SIR-Laser bei verschiedenen globalen Beleuchtungsintensitäten (1/3 Sonnen zu 0 Sonne). Die Linienscans in a) repräsentieren die Bereiche mit Verlusten in Abb. 4.8 b) (vgl. SIR-Übersichtsbild in Abb. 4.9 b)): weiße Pfeile zeigen den Weg des Linienscans an. Im Vergleich mit der „normalen“ Fläche (vgl. c)) ist die Photostromantwort auf der linken Seite bei a) immer kleiner. Höhere globale Beleuchtung erhöht die Photostromantwort. Die linke Seite ohne Beleuchtung zeigt eine konstante, sehr kleine Antwort (d. h. „Parasitic shunting“ wie im Text beschrieben). Bei allen anderen Linienscans ist ein Plateau mit hohem Photostrom sichtbar (niedrigeres S_b aufgrund des SiO/SiN-Schichtsystems, siehe Abb. 3.12 b)), welches angrenzend zu Flächen der Punktkontakte mit verringertem Photostrom ist (höheres S_b aufgrund des Al-BSFs).

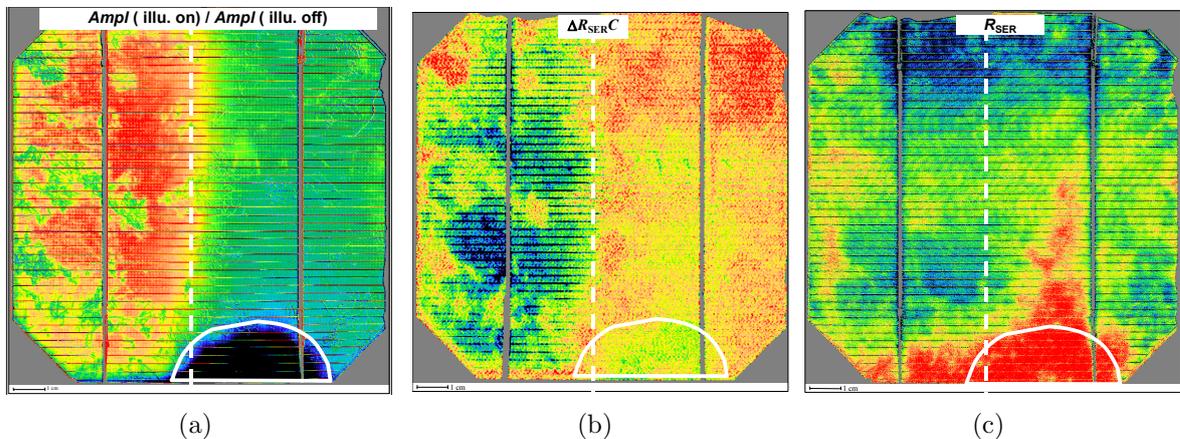


Abb. 4.10: Bilder von verschiedenen SIR Laser (934 nm) Messungen (WerteFarbskala wie in Abb. 4.8): a) Amplitudenverhältnisbild (d. h. „illu on/off“); b) Differenzbild berechnet nach Gl. (2.18), das $\Delta R_{SER} C$ aufgrund geänderter globaler Beleuchtung darstellt, c) Standard- R_{SER} -Bild nach [45]. Trotz eines Offsets (Änderung vom Skalenfaktor) an der gestrichelten Linie wird eine gute Übereinstimmung zwischen b) und c) gefunden, was darauf hinweist, dass sich auf den Flächen links und rechts der gestrichelten Linie hauptsächlich ΔC ändert, wenn sich die globale Beleuchtung ändert. Es gibt eine sehr gute Korrelation zwischen a) und b), der weiße Halbkreis markiert erwartete Abweichungen aufgrund des sehr hohen Serienwiderstandes auf der Zellfrontseite.

In dem durch ein weißes Rechteck markierten Bereich in Abb. 4.8 b) wurden Kurzschlussstrom- dI_{SC} -Messungen mit hoher Ortsauflösung durchgeführt unter Verwendung von drei Lasern mit unterschiedlicher Wellenlänge (RED, IR und SIR), mit und ohne zusätzliche globale Beleuchtung (1/3 und 0 Sonne). Für jede Wellenlänge wird das Amplitudenverhältnis berechnet, indem die Bilder mit Beleuchtung durch die Bilder im Dunkeln geteilt werden; diese Verhältnisbilder sind in Abb. 4.8 c) mit gleicher Skalierung gezeigt. Der Photostromgewinn bei globaler Beleuchtung mit 1/3 Sonne ist am stärksten für den tiefeindringenden SIR-Laser (ungefähr 30 %), was ein starker Hinweis darauf ist, dass, wie erwartet, der Gewinn des Photostroms aufgrund der zusätzlichen Beleuchtung hauptsächlich von der Reduktion der Rekombinationsverluste auf der Rückseite herrührt.

Für die gleiche Solarzelle sind Kurzschlussstrom- dI_{SC} -Linienscans des SIR-Lasers mit extrem hoher Ortsauflösung (120 Pixel pro mm) und verschiedenen globalen Beleuchtungsintensitäten in Abb. 4.9 gezeigt. Die exakten Lagen der Start- und Endpunkte der zwei Linienscans, welche für die Scans in Abb. 4.9 a) und c) verwendet wurden, sind in Abb. 4.9 b) eingezeichnet (diagonal verlaufende Pfeile). Beide Linienscanpositionen befinden sich in homogenen Körnern, so dass Volumenrekombination die Messung nicht beeinflusst.

Die Linienscans in Abb. 4.9 c) zeigen Daten in einem defektfreien Bereich. Die Änderung der globalen Beleuchtung ändert die Form dieser Kurven nicht; lediglich ein Offset ist sichtbar. Im Zentrum erkennt man ein Plateau mit hohen Photostromwerten. Der Photostrom an den Kontaktlöchern ist stark reduziert mit einem Übergangsbereich von ungefähr 200 μm Breite, welcher durch die zwei senkrechten Linien in Abb. 4.9 c) angezeigt ist.

Wie im Theorie-Abschnitt 2.5 beschrieben, zeigen dielektrisch passivierte Rückseiten injektionslevelabhängige Rekombination, für die mehrere Effekte verantwortlich sein können. Vor allem der sehr flache Kurvenverlauf in Abb. 4.9 a) ohne Zusatzbeleuchtung legt jedoch die Vermutung nahe, dass ein guter querleitfähiger Inversionskanal vorhanden ist, der nahezu unabhängig vom Abstand zu den Punktkontakten Ladungsträger zu den Punktkontakten führt, an denen sie über einen Shunt-Widerstand kurzgeschlossen werden. Diese Interpretation ist auch konsistent zu dem Fehler in der Prozessführung, dass der parasitäre Emitter auf der Rückseite auf der linken Seite durch einen inhomogenen HF-Dip nicht komplett abgetragen wurde.

4.3.2 $R_{SER}C$ -Effekte aufgrund von „Parasitic shunting“

Abbildung 4.10 a) zeigt das Bild in Abb. 4.8 a) geteilt durch das Bild in Abb. 4.8 b), welches die durch parasitäre Shunts kurzgeschlossenen Bereiche deutlich sichtbar macht (rote Farbe). Aus den Bildern der Phasenverschiebung in Abb. 4.8 a) und b) und aus zwei zusätzlichen Bildern der Phasenverschiebung mit höheren Messfrequenzen (hier nicht gezeigt) wird ein Differenzbild der Phasenverschiebung nach Gl. (2.18) berechnet, siehe Abb. 4.10 b). Das Standard-CELLO-Serienwiderstandsbild R_{SER} ist in Abb. 4.10 c) gezeigt. Klar ist der Unterschied zwischen der linken und rechten Seite, markiert durch die gestrichelte Linie, in Abb. 4.10 a) und b) zu erkennen, jedoch nicht in Abb. 4.10 c). Zusätzlich sind einige Eigenschaften, welche im Serienwiderstandsbild sichtbar sind, auch in Abb. 4.10 b) zu erkennen. Beide Ergebnisse können dadurch leicht verstanden werden, dass der Hauptunterschied zwischen an- und ausgeschalteter Beleuchtung eine signifikante Änderung in der Kapazität ΔC auf der fehlerhaften linken Seite der Solarzelle ist. Dieses

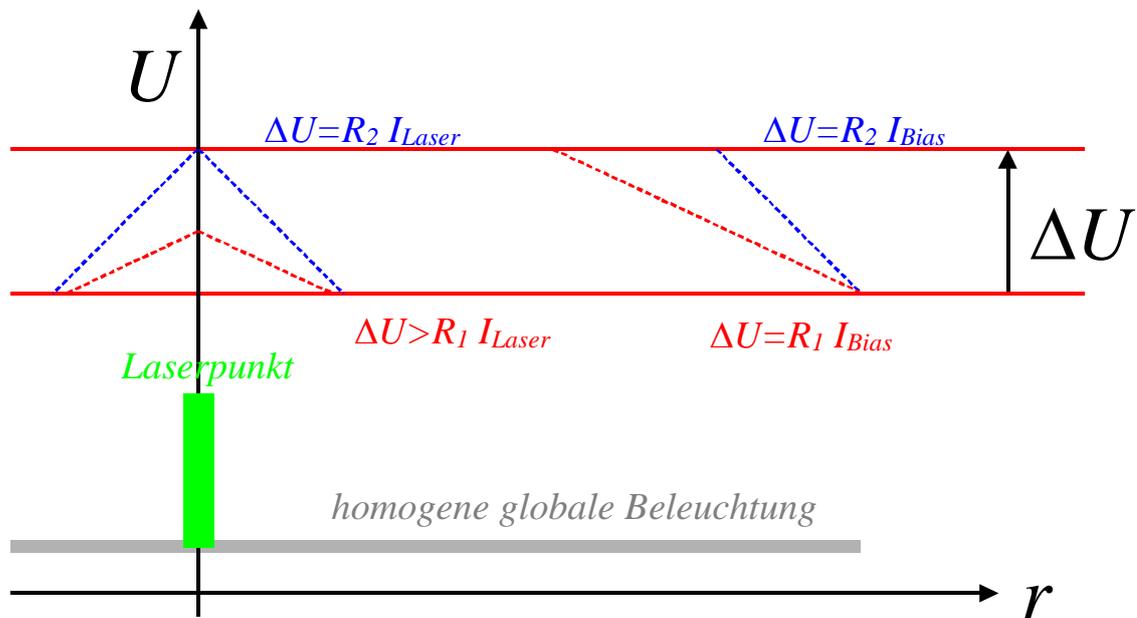


Abb. 4.11: Schema der Strom- und Spannungsverteilung in der Inversions-Schicht für verschiedene Widerstände des Kanals ($R_1 < R_2$) und für verschiedene Ströme ($I_{\text{Laser}} \ll I_{\text{Bias}}$). Nur mit $R_1 I_{\text{Laser}} < \Delta U$ ist der Kanal nicht geschlossen. Unterschieden wird zwischen Positionen mit lokaler Laserbeleuchtung (Laser) und globaler homogener Beleuchtung („Bias“).

Ergebnis ist konsistent mit der Existenz einer Inversionsschicht mit einer Kapazität ΔC , welche verschwindet, wenn die Zelle beleuchtet wird.

So gut die Erklärung mit der Inversionsschicht auch scheint, es gibt damit ein Problem: Warum führt das lokale Laserlicht nicht zu einem Verschwinden der Inversionsschicht, wie bei globaler Beleuchtung, besonders, weil die Laserbeleuchtung lokale Stromdichten induziert, welche ungefähr eine Größenordnung größer sind als die der globalen Beleuchtung. Die Antwort liegt in der Inhomogenität der Beleuchtung. Der Spannungsabfall ΔU , welcher benötigt wird, um den Inversionskanal zu schließen, wird durch einen ohmschen Spannungsabfall lateral über der Inversionsschicht hervorgerufen, wie es schematisch in Abb. 4.11 gezeigt ist. Für einen elektrischen Widerstand des Kanals R_{Kanal} muss der durch den Laser generierte Photostrom I_{Laser} groß genug sein, um den ohmschen Verlust zu erzeugen, der zu einem Schließen des Kanals führt:

$$R_{\text{Kanal}} I_{\text{Laser}} > \Delta U. \quad (4.2)$$

Offensichtlich ist diese Bedingung nicht für den SIR-Laser auf der linken Seite der Solarzelle erfüllt.

Zufällig ist die Solarzelle auf der fehlerhaften linken Seite so produziert, dass sich die Gültigkeit von Gl. (4.2) leicht überprüfen lässt. In Abb. 4.12 ist zu erkennen, dass mehrere Punktkontakte am linken Rand der Zelle nicht geöffnet sind. Entsprechend ist der Serienwiderstand nah an der Kante groß (vgl. Abb. 4.12 b)). In diesem Bereich ist nun der Kurzschlussphotostrom viel größer als in den benachbarten Bereichen mit Punktkontakten; keine signifikanten Unterschiede bei Ein- oder Ausschalten der globalen Beleuchtung

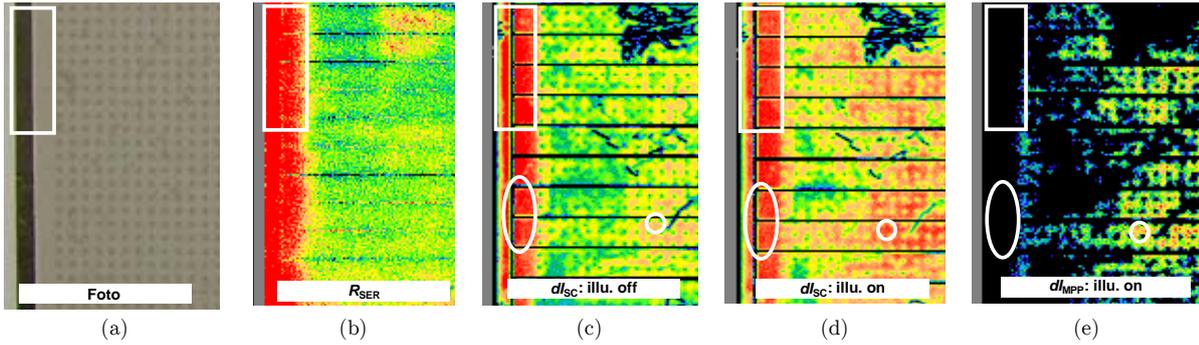


Abb. 4.12: a) Das Foto der Zellrückseite (gespiegelt für einen leichteren Vergleich) zeigt eine Fläche (weißes Rechteck) mit fehlenden Kontaktlöchern (dunkle Punkte) und dadurch erhöhtem Serienwiderstand. Wie erwartet, ist dieses im R_{SER} -Bild sichtbar, wie gezeigt in b) (rot bedeutet hoher R_{SER}). Kurzschlussstrom- dI_{SC} -Bilder mit dem SIR-Laser (934 nm) ohne c) und mit d) globaler Beleuchtung zeigen einen großen Photostrom (rot) für diese Fläche. e) Bild des Photostroms beim Punkt maximaler Leistung dI_{MPP} unter Verwendung des SIR-Lasers und mit globaler Beleuchtung, ermöglicht die Unterscheidung zwischen erhöhtem R_{SER} und verbesserter Passivierung (siehe Kreise) mit nur einem Strombild.

werden gefunden. Jetzt ist der Laserstrom wahrscheinlich groß genug, um Gl. (4.2) zu erfüllen. Wenn berücksichtigt wird, dass die ohmschen Verluste aufgrund der weit vom Beleuchtungsfleck entfernten Punktkontakte stark erhöht sind ($R_{Kanal2} > R_{Kanal1}$), kann dieses Ergebnis durch Gl. (4.2) verstanden werden.

Die Gültigkeit von Gl. (4.2) wird in einem letzten Satz von zusätzlichen Experimenten dadurch überprüft, dass der Strom, hervorgerufen durch die globale Beleuchtung, nacheinander verringert wird. Unter Verwendung einer Maske wurden nur quadratische Flächen um den Laserpunkt herum beleuchtet mit $1/3$ Sonne Intensität des homogenen weißen Lichts. Bei der beleuchteten Fläche unter 2 mm^2 wurde parasitäres Shunten wieder sichtbar. Die zweite Bedingung der globalen Beleuchtung, welche notwendig ist, um den Inversionskanal zu schließen, ist auch in Abb. 4.11 veranschaulicht.

Wie in diesem CELLO-Beispiel gezeigt, kann die Begrenzung der globalen Beleuchtungsfläche auf kleine Größen dazu führen, dass „Parasitic shunting“ auftritt und so der Bereich als Gebiet mit erhöhtem S_b misinterpretiert werden kann. Dies gilt besonders für die korrekte Interpretation von Ergebnissen von Messungen mit großer Wellenlänge in Kombination mit kleinen beleuchteten Flächen (z. B. IQE- oder Reflektivitätsmessungen, die mit teilweiser Beleuchtung arbeiten).

Name	Maske geöffnet durch	Markierung	Bildfarbe	
			Fig. 4.14 b)	Fig. 4.14 c)
A	Punkt	Kreis	gelb	gelb
B	Beschädigung	Ellipse	gelb	blau
C	Fläche	Rechteck	blau	blau

Tabelle 4.1: Klassifizierung des Al-Rückseitenkontakts.

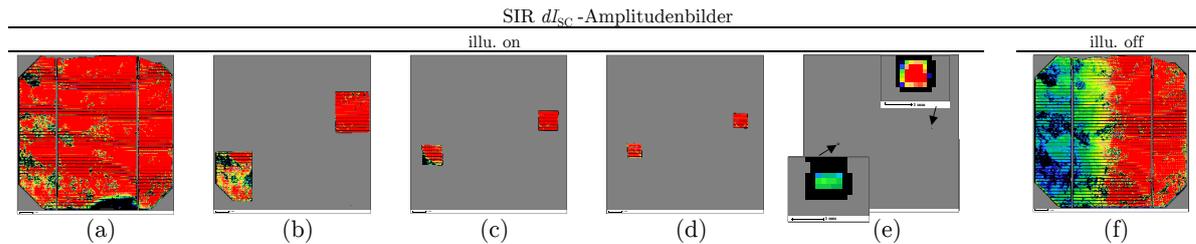


Abb. 4.13: Abschattungsexperimente, gezeigt sind Amplitudenbilder des SIR-Lasers: Von a) nach e) werden immer größere Teile einer mc-Si-Solarzelle unter globaler Beleuchtung durch eine Papierblende abgeschattet. Die grauen Zellbereiche von a) bis e) repräsentieren die abgeschattete Fläche; in e) sind die Flächen zur besseren Sichtbarkeit vergrößert. Erst bei sehr kleinen Flächen in e) mit unter 2 mm^2 wurde parasitäres Shunten wieder sichtbar. Zum Vergleich ist die Zelle mit parasitären Shunten ohne globale Beleuchtung in f) gezeigt. Zur besseren Vergleichbarkeit haben a) bis f) eine identische Farbskala.

Auf Grund eines weiteren prozessinduzierten Defekts, wie er in Abb. 4.14 a) sichtbar ist, konnten auch Bereiche mit Al-BSF detailliert untersucht werden. Drei unterschiedliche Bereiche mit Al-BSF werden unterschieden, wie in Tabelle 4.1 zusammengefasst wird. Besonders der Kantenbereich C zeigt keine Abhängigkeit von der globalen Beleuchtung, wie es für Al-BSF Rückseitenpassivierung zu erwarten ist. Für die Bereiche A, B und C ist das CELLO- R_{SER} -Bild (hier nicht gezeigt) sehr homogen, aber das Bild der Phasenverschiebung von dI_{SC} mit voller globaler Beleuchtung in Abb. 4.14 d) ist genau invers zu Abb. 4.14 b). Der Bereich B mit großflächiger Al-BSF-Rückseitenpassivierung zeigt keine Injektionslevelabhängigkeit, was ein starker Hinweis darauf ist, dass auch die Al-BSF Punktkontakte keine injektionslevelabhängige Rekombination zeigen. Dieses Ergebnis liefert also einen weiteren, unabhängigen experimentellen Hinweis, dass es sich bei dem dominanten Verlustmechanismus auf der linken Seite der Solarzelle wirklich um „Parasitic shunting“ handelt.

Die Diskussion und Interpretation der Rückseiteneigenschaften der Solarzelle, dargestellt in Abb. 4.9 und Abb. 4.10, liefert so klare Ergebnisse, weil es einen klaren Unterschied zwischen linker und rechter Seite der Zelle gab. Es konnte ein Fabrikationsschritt identifiziert werden, welcher die nahezu perfekte gerade Trennungslinie erklären kann: Ein sehr kurzer (12 Sekunden) chemischer Rückätzschritt, um den parasitären Emitter von der Zellrückseite zu entfernen, durch Dippen in CPX4. Dieses wurde manuell durchgeführt und jegliche Verzögerung mag zu einer nicht perfekten Entfernung der hochdotierten Schicht auf der linken Seite der Zelle führen. Nach weiteren Reinigungsschritten wurde die Rückseite der Zelle mit dem dielektrischen Schichtsystem beschichtet, so dass eine hoch n-dotierte Schicht unter dem dielektrischen Schichtsystem existiert, welche als n-leitender Kanal die oben beschriebenen Phänomene erklären kann.

4.3.3 Fazit

Die Kombinationen von CELLO-Messungen mit unterschiedlichen Messbedingungen (verschiedene Laserwellenlängen, verschiedene Ortsauflösungen und verschiedene Intensitätsstufen der globalen Hintergrundbeleuchtung) ermöglichen eine systematische Untersu-

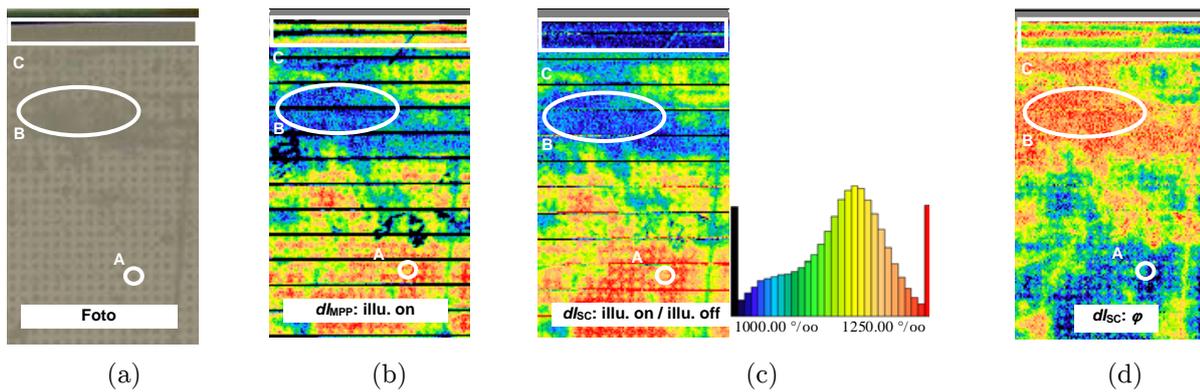


Abb. 4.14: a) Foto der Zellrückseite (gespiegelt für einen leichteren Vergleich); b)–d) Bilder aufgenommen mit dem SIR-Laser (934 nm): b) Photostrom am Punkt maximaler Leistung dI_{MPP} mit $1/3$ Sonne globaler Beleuchtung; c) Illu. on/off-Verhältnisbild der Kurzschlussstrom- dI_{SC} -Bilder; d) Phasenverschiebung des Kurzschlussstroms mit globaler Beleuchtung. Die hervorgehobenen (weiße Markierung) dunkelgrauen Flächen in a) visualisieren Flächen an der Zellkante (C) oder Fehler in der Lithographiemaske (B) und sind deshalb Bereiche, bei denen der Al-Rückseitenkontakt auf großen Flächen stattfand (d. h. nicht begrenzt auf die Punktkontakte; A).

chung bei Photostromverlusten auf Zellen mit „Parasitic shunting“. Starke Effekte von „Parasitic shunting“ aufgrund lokaler und globaler Beleuchtungsintensität und aufgrund lokaler Serienwiderstandsverteilung können durch ein einfaches Modell erklärt werden, das eine Bedingung für die Inversionsschicht einführt, welche zu „Parasitic shunting“ führt. Als Folge davon ist es für die korrekte Interpretation von Photostrommessungen, besonders mit Licht großer Eindringtiefen, welche sensitiv auf S_b sind, notwendig, die lokale laterale Serienwiderstandsverteilung und die Verteilung und Größe der lokalen und/oder globalen Photoströme mit zu berücksichtigen. Es wird demonstriert, dass eine Kombination von typischen CELLO-Messungen lokale Verluste verursacht durch „Parasitic shunting“ von anderen Verlusten, wie reduzierte Rückseitenpassivierung (erhöhtem S_b) oder rückseitiger Serienwiderstand, unterscheiden kann. Dies ermöglicht die Identifizierung von Wirkungsgrad limitierenden Prozessschritten und somit eine genauere Zelloptimierung für Solarzellen mit Rückseitenpassivierung.

4.4 Charakterisierung von Tandemsolarzellen durch Messung der zweiten Harmonischen

Die Ergebnisse dieses Abschnitts sind die Früchte einer erfolgreichen Kooperation mit der Firma Bosch und wurden teilweise schon auf der EUPVSEC 2012 in Frankfurt veröffentlicht [51].

Wie im Experimenterteil in Abschnitt 3.4.4 genauer beschrieben, wird eine a-Si/ μ -Si-Tandemsolarzelle, deren obere a-Si-Teilzelle empfindlich auf blaues Laserlicht ist, und deren untere μ -Si-Teilzelle, welche für infrarotes Licht empfindlich ist, untersucht. Dabei werden drei Sätze von Experimenten durchgeführt mit Kombinationen von zwei konfokalen Laserstrahlen (Blue: 401 nm, IR: 830 nm), also die Laserfarben, auf welche die Teilzellen selektiv ansprechen. Um die Effizienz der Einzelzellen sowie ihre Wechselwirkung zu untersuchen, werden Messungen mit jeweils einem der beiden Laser und Messungen mit beiden Lasern kombiniert. Für den Fall, dass beide Laser konfokal über die Solarzelle rastern, wird entweder einer der beiden Laser mit konstanter Intensität betrieben, oder beide Laser sind intensitätsmoduliert. Zu Details siehe Abschnitt 3.4.4. Der folgende Abschnitt 4.4.1 diskutiert Experimente, bei denen ein Laser mit einer Frequenz moduliert wird, während der andere Laser ausgeschaltet ist oder bei konstanter Intensität gehalten wird. Danach folgt Abschnitt 4.4.2 mit Experimenten mit zwei simultanen Perturbationsfrequenzen, beide Laserstrahlen arbeiten also simultan mit unterschiedlichen Modulationsfrequenzen.

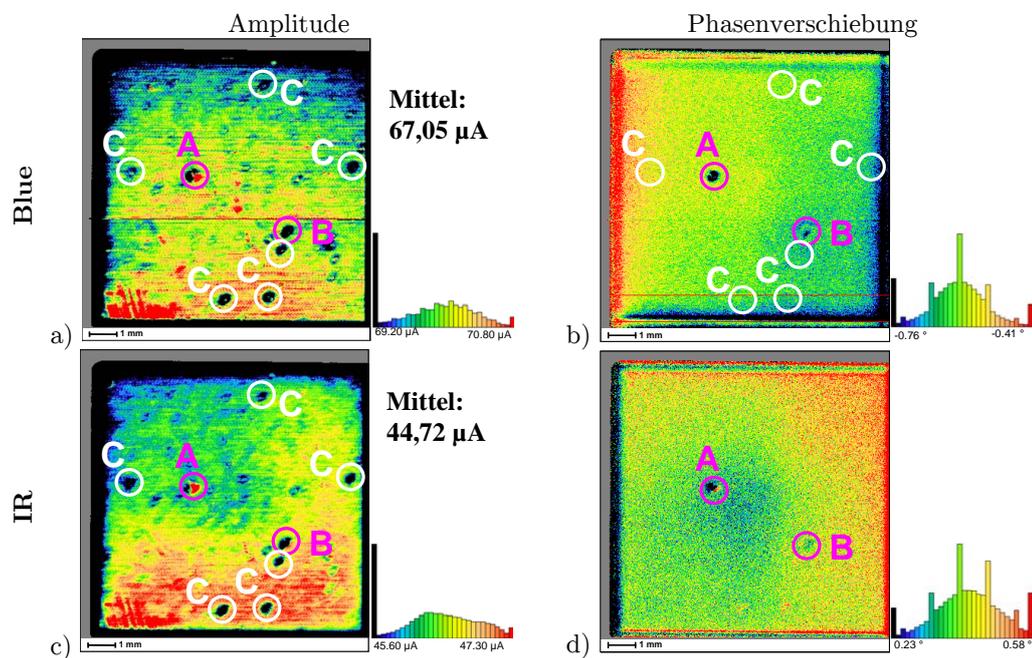


Abb. 4.15: a) Amplitude $A_{x,y}(\omega_a)$ und b) Phasenverschiebung $\varphi_{x,y}(\omega_a)$ des Kurzschlussstroms des blauen Lasers (bei 6 kHz), gemessen bei voller konstanter Intensität des konfokalen IR-Lasers. c) Amplitude $A_{x,y}(\omega_a)$ und d) Phasenverschiebung $\varphi_{x,y}(\omega_a)$ des Kurzschlussstroms des IR-Lasers (bei 6 kHz), gemessen bei voller konstanter Intensität des konfokalen blauen Lasers.

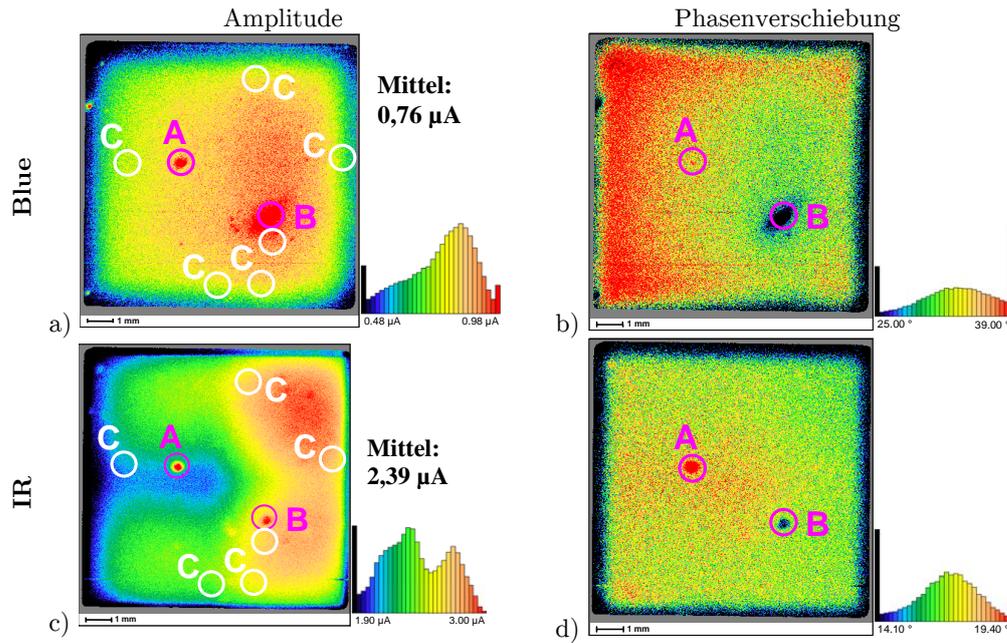


Abb. 4.16: a) Amplitude $A_{x,y}(\omega_a)$ und b) Phasenverschiebung $\varphi_{x,y}(\omega_a)$ des Kurzschlussstroms des blauen Lasers (bei 6 kHz), gemessen bei ausgeschaltetem IR-Laser. c) Amplitude $A_{x,y}(\omega_a)$ und d) Phasenverschiebung $\varphi_{x,y}(\omega_a)$ des Kurzschlussstroms des IR-Lasers (bei 6 kHz), gemessen bei ausgeschaltetem blauen Laser.

4.4.1 Messungen mit jeweils einem intensitätsmodulierten Laser

Bilder vom ersten Satz von Experimenten mit einem der zwei Laser als konstante Hintergrundbeleuchtung und einem Laser moduliert mit $\omega_a = 2\pi \times 6$ kHz sind in Abb. 4.15 gezeigt. Bilder vom zweiten Satz von Experimenten ohne konstante Hintergrundbeleuchtung und mit einem mit ω_a modulierten Laser sind in Abb. 4.16 dargestellt. In Abb. 4.15 a) „flutet“ die konstante IR-Hintergrundbeleuchtung die untere Teilzelle, d. h. sie führt zu einem Überschuss an Ladungsträgern aus der unteren Teilzelle. Unter dieser Bedingung limitiert die untere Teilzelle nicht den Photostrom, welcher vom blauen Laser auf der oberen Teilzelle generiert wird. Somit entspricht Abb. 4.15 a) dem konventionellen LBIC Bild der oberen Teilzelle. Entsprechend ist für Abb. 4.15 c) die obere Zelle vom konstanten blauen Laser geflutet, der IR-Laser-Photostrom ist nicht limitiert durch die obere Teilzelle, somit entspricht Abb. 4.15 c) dem konventionellen LBIC-Bild der unteren Teilzelle.

Im Gegensatz dazu generiert in Abb. 4.16 a) der blaue Laser Photostrom in der oberen Teilzelle, während kein Photostrom in der unteren Teilzelle generiert wird. So limitiert der lokale Dunkelstrom, d. h. der Leckstrom, der unteren Teilzelle den Strom durch die Serienschaltung von oberer und unterer Teilzelle. Abbildung 4.16 a) reflektiert deshalb lokale Eigenschaften der unteren Teilzelle, welche den Dunkelstrom dominieren, z. B. die Qualität des p-i-n-Übergangs oder Zustände in der Grenzschicht, welche zu Rekombinationsprozessen führen. Analog dazu repräsentiert Abb. 4.16 c) den Leckstrom der oberen Teilzelle.

Als Beispiel für die zusätzliche Information, welche aus den Bildern von Abb. 4.16 extrahiert werden kann, ist das Verhältnis der Amplituden beider Leckströme, in Abb. 4.17

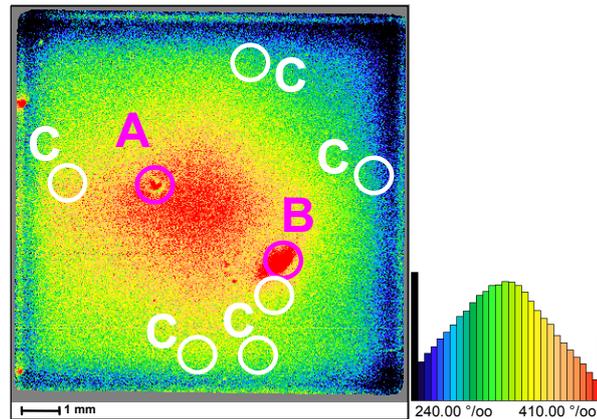


Abb. 4.17: Blue/IR-Amplitudenverhältnisbild des zweiten Satzes an Experimenten, d. h. Abb. 4.16 a) geteilt durch Abb. 4.16 c).

dargestellt. Überraschenderweise zeigt es eine zentrische Symmetrie, die in den anderen Bildern nicht sichtbar ist, und die entweder durch nicht lineare Einflüsse des Serienwiderstandes erklärt werden kann, vgl. [52] für ein typisches Serienwiderstandsmuster, oder durch Unterschiede in der spektralen Absorption beider Laser. Der Vergleich zwischen Abb. 4.16 a) und Abb. 4.16 c) offenbart, dass die Leckstromverteilung der unteren Teilzelle offensichtlich viel homogener ist als die der oberen Teilzelle, welche eine Spiegelsymmetrie aufweist. Dies ist ein starker Hinweis darauf, dass der p-i-n-Übergang der oberen Teilzelle zumindest auf der linken Seite degradiert ist.

Verschiedene lokale Defekte (bezeichnet als A, B und C) sind in Abb. 4.15 bis 4.17 eingezeichnet. In Abb. 4.16 sind nur zwei dieser lokalisierten Defekte sichtbar (A und B). Das andersartige Verhalten der Phasenverschiebung in Abb. 4.16 d) weist schon darauf hin, dass die Defekte A und B verschiedene Ursachen haben. Im Verhältnisbild in Abb. 4.17 ist Defekt A kaum zu sehen, was darauf hinweist, dass A eine Region mit erhöhtem Leckstrom in beiden Teilzellen repräsentiert. Ein möglicher Kandidat für ein solches Verhalten ist ein Defekt an der Grenzfläche zwischen beiden Teilzellen, wie z. B. eine schlechte Tunnelrekombinationsdiode, welche zu einer erhöhten lokalen Rekombination in beiden Teilzellen führt. Dagegen ist Defekt B markant rot in Abb. 4.17, was einen Bereich mit erhöhtem Leckstrom hauptsächlich in der unteren μ -Si-Teilzelle anzeigt. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte ein schlechter p-i-n-Übergang sein. Alle anderen sichtbaren Defekte, in Abb. 4.15 als C hervorgehoben, sind Bereiche mit Verlusten im Photostrom, entweder in einer oder in beiden Teilzellen, welche nicht im Leckstrombild auftauchen. Somit zeigt Defekt C nur einen reduzierten Photostrom, welcher möglicherweise in Beziehung zu optischen Verlusten (hohe Reflektivität), schlechter Generation (dünner Absorber, ...) oder hoher Rekombination steht.

Für die Analyse von LBIC-Messungen von Tandemsolarzellen wird oft eine globale Hintergrundbeleuchtung verwendet, um die angrenzende Teilzelle zu fluten. Diese Beispiele zeigen, dass auch lokales Fluten zu guten Ergebnissen führen kann. Photostrombilder können ebenso wie Leckstrombilder ziemlich einfach gemessen werden. Besonders die Information über den lokalen Leckstrom kann noch einfacher vermessen werden als bei Standard-Zellen mit nur einem p-n-Übergang. Im folgenden wird ein zweiter Ansatz diskutiert, welcher nahezu die gleiche lokale Information extrahiert, aber mit weniger Messzeit

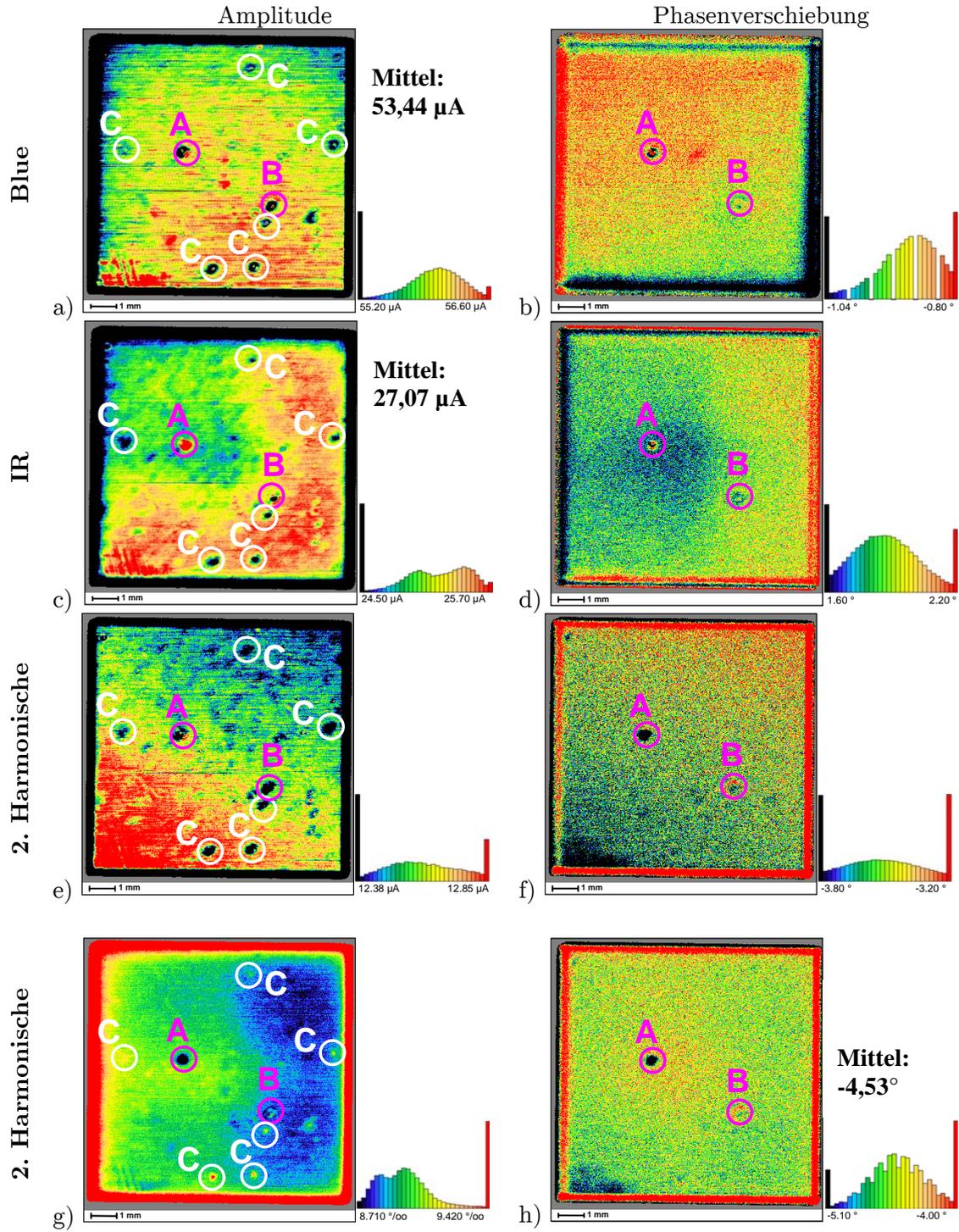


Abb. 4.18: Simultan gemessene Kurzschlussstrombilder unter Verwendung zweier konfokaler Laserstrahlen: Blauer Laser bei Frequenz $f_a = 10$ kHz, IR-Laser bei Frequenz $f_b = 6$ kHz; a) Amplitude $A_{x,y}(\omega_a)$ und b) Phasenverschiebung $\varphi_{x,y}(\omega_a)$ des blauen Lasers; c) Amplitude $A_{x,y}(\omega_b)$ und d) Phasenverschiebung $\varphi_{x,y}(\omega_b)$ des IR-Lasers; e) Amplitude $A_{x,y}(\omega_a + \omega_b)$ und f) Phasenverschiebung $\varphi_{x,y}(\omega_a + \omega_b)$ von der gemischten zweiten Harmonischen zwischen dem blauen und dem IR-Laserphotostrom; g) Amplitudenverhältnisbild nach Gl. (2.26), d. h. Abb. 4.18 e) geteilt durch Abb. 4.18 a) und Abb. 4.18 c) enthält Zellinformationen äquivalent zu Messungen in Abb. 4.16 c); h) Phasenverschiebungsverhältnisbild nach Gl. (2.26), d. h. Abb. 4.18 f) minus Abb. 4.18 b) und minus Abb. 4.18 d).

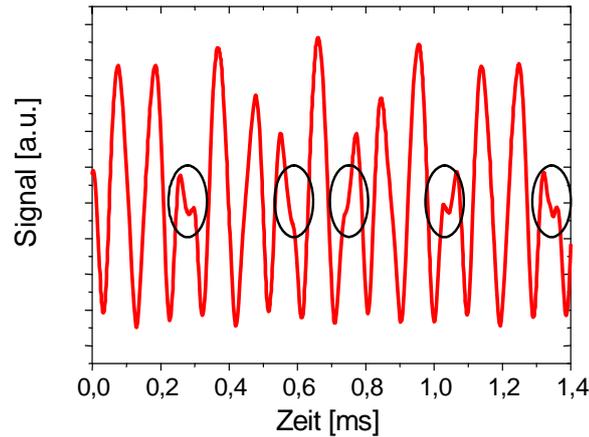


Abb. 4.19: Signal der Multifrequenzantwort von Abb. 4.18. Die schwarzen Kreise markieren nichtlineares Verhalten, welches manchmal sichtbar ist.

verbunden ist.

4.4.2 Zwei simultane Perturbationsfrequenzen

Abbildung 4.18 präsentiert Kurzschlussstromdaten, simultan gemessen bei Anlegen von $\omega_a = 2\pi \times 10$ kHz am blauen Laser und $\omega_b = 2\pi \times 6$ kHz am IR-Laser. Abbildung 4.19 zeigt für diese Messung ein Beispiel für die Zeitabhängigkeit der Gesamtantwort des Photostroms. Bei Standard-Lock-in-Messungen wären die asymmetrischen Peaks, markiert durch die schwarzen Kreise, ein starker Hinweis auf einen Messfehler, weil sie nicht durch lineare Antwort erklärbar sind. Sorgfältige Untersuchungen zeigten, dass diese nichtlineare Antwort kein Messartefakt ist, sondern eine intrinsische Eigenschaft der Tandemsolarzellenstruktur. Natürlich beeinflusst der nichtlineare Effekt nach Gl. (2.25) die gesamte Periodenlänge und ist nicht begrenzt auf die markierten Bereiche, so dass Messungen der zweiten Harmonischen für die Frequenzen $2\omega_a$ und $2\omega_b$ (hier nicht gezeigt) und für $\omega_a + \omega_b$ verwendet wurden, um die Generation der zweiten Harmonischen zu analysieren.

Abbildung 4.18 a) zeigt das vom Kurzschlussstrom generierte Amplitudenbild des blauen Lasers und Abb. 4.18 c) das des IR-Lasers, wenn beide Bilder simultan vermessen werden. Der Vergleich zu Abb. 4.15 a) und c) zeigt nahezu identische Bilder mit Mittelwerten, welche nur leicht reduziert sind. Trotz der Tatsache, dass keine der Teilzellen mit Ladungen zugunsten der angrenzenden Teilzelle geflutet ist, sind keine signifikanten lokalen Stromlimitierungen aufgrund von fehlendem „Current matching“ sichtbar. Das ist ein ziemlich erstaunliches Ergebnis. Das Verhältnis zwischen den zwei Photostrombildern des blauen Lasers in Abb. 4.18 a) und Abb. 4.15 a) ist in Abb. 4.20 gezeigt. Das entsprechende Bild für den Photostrom des IR-Lasers ist in Abb. 4.21 gezeigt. Trotz des kleinen Messartefakts, welcher zu der horizontalen schwarzen Linie im unteren Teil von Abb. 4.20 führt, ist das Verhältnis extrem homogen; nur die Fläche von Defekt A ist sichtbar. Das Verhältnisbild des IR-Lasers in Abb. 4.21 ist viel inhomogener und zeigt höhere Verluste in Abb. 4.18 c) im linken als im rechten Teil. Es gibt eine klare Korrelation zwischen Abb. 4.21 und dem Bild des Leckstroms in Abb. 4.16 c). Das gleiche gilt für Abb. 4.20 und Abb. 4.16 a). Kurz zusammengefasst, für die simultane Messung beider Photostrom-

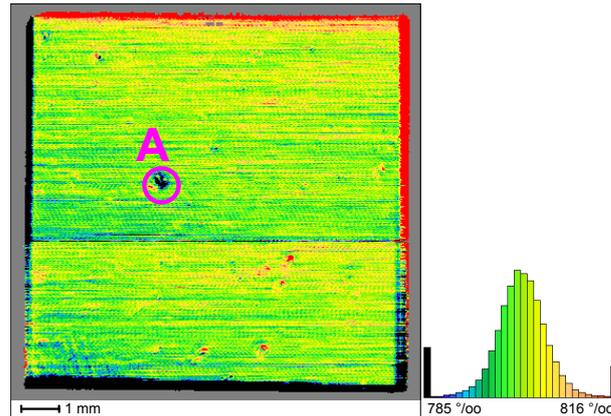


Abb. 4.20: Amplitudenverhältnisbild des blauen Lasers zwischen drittem und erstem Messsatz, d. h. Abb. 4.18 a) geteilt durch Abb. 4.15 a).

bilder scheint „Current matching“ ein stärker limitierender Faktor in jenen Bereichen zu sein, in welchen die angrenzende Teilzelle einen kleineren Leckstrom aufweist, d. h. wo es wahrscheinlich weniger Probleme mit dem p-i-n-Übergang gibt.

Ähnliche Ergebnisse können aus der Analyse der zweiten Harmonischen extrahiert werden. Abbildung 4.18 e) und f) zeigen die Amplitude und die Phasenverschiebung für die Summenfrequenz $\omega_a + \omega_b$, sich daraus ergebene Verhältnisbilder nach Gl. (2.26) sind in Abb. 4.18 g) and h) gezeigt. Abbildung 4.18 g) weist eine klare Antikorrelation zu Fig. 4.16 c) auf. Dies Ergebnis zeigt klar, dass die zweite Harmonische in diesen CELLO-Messungen wirklich lokale Solarzelleneigenschaften widerspiegelt. Es enthält im wesentlichen dieselbe Information wie sie bereits für Abb. 4.21 diskutiert wurde: Die kleinste Antwort der zweiten Harmonischen wurde auf der rechten Seite der Tandemzelle gefunden. Auf dieser Seite ist der Photostrom des IR-Lasers am wenigsten von der „Current matching“-Limitierung beeinflusst. Dies ist in guter Übereinstimmung mit der Erwartung, wie sie im Theorieteil diskutiert wurde (vgl. Abschnitt 2.4), dass nicht vorhandenes „Current matching“ zu einer starken nichtlinearen Antwort führt.

Bis jetzt beinhaltete die komplette Diskussion nur die Amplitudenbilder, obwohl die Phasenverschiebung wertvolle unabhängige Informationen enthält. Zum Beispiel erlaubt das Bild der Phasenverschiebung in Abb. 4.16 d) die Unterscheidung zwischen Defekten des Typs A und B, während man im Gegensatz dazu mindestens zwei Amplituden-Bilder benötigt. Eine andere wichtige Information, welche man aus der Phasenverschiebung extrahieren kann, ist, dass die Leckstromprobleme der oberen Teilzellen nicht direkt in Beziehung zu den lokalen Serienwiderstandsproblemen stehen, weil keine Korrelation, sondern eine Antikorrelation zwischen der Amplitude und der Phasenverschiebung in Abb. 4.16 a) und Abb. 4.16 b) gefunden wurde [37].

Es ist noch nicht klar, warum Abb. 4.20 und Abb. 4.21 sehr homogen sind (unter Vernachlässigung der Leckstromeinflüsse in Abb. 4.21) und warum die Mittelwerte des simultan gemessenen Photostroms für beide Teilzellen, Abb. 4.18 a) und Abb. 4.18 c), so hoch ist. Da beide Teilzellen in Serie verschaltet sind, ist „Current matching“ jederzeit notwendig. Da beide Laser mit unterschiedlichen Frequenzen moduliert werden, wird eine weitere Stromquelle benötigt, welche „Current matching“ erlaubt, was nicht der Leckstrom sein

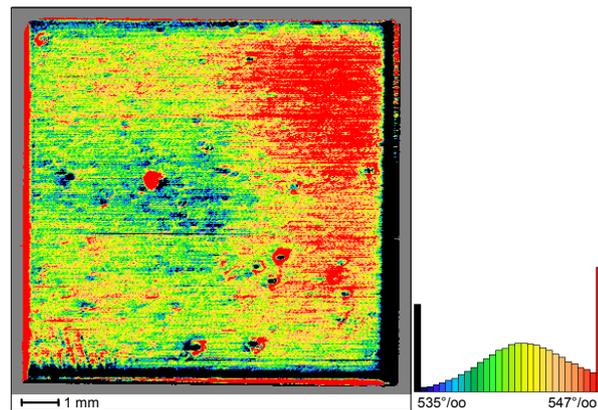


Abb. 4.21: Amplitudenverhältnisbild des IR-Lasers zwischen drittem und erstem Messsatz, d. h. Abb. 4.18 c) geteilt durch Abb. 4.15 c).

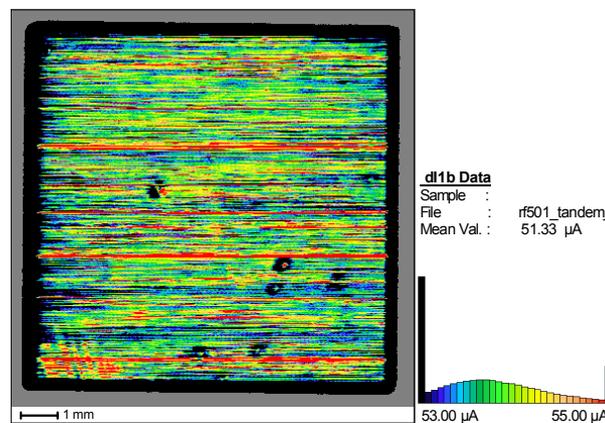


Abb. 4.22: Bild gemessen unter den gleichen Bedingungen wie in Abb. 4.18 a), aber mit Vibrationen des Lüfters der globalen Beleuchtung, welcher zusätzliche nichtlineare Wechselwirkungen induziert, die als horizontale Linien im Bild sichtbar sind.

kann. Alle experimentellen Ergebnisse sind konsistent mit der Annahme, dass photogenerierte Ladungen, welche nicht sofort eine der Teilzellen aufgrund von fehlendem „Current matching“ verlassen können, sich zu einer Art Ladungsdepot aufintegrieren, was dann als Stromquelle für die angrenzende Teilzelle dienen könnte, um die „Current matching“-Bedingung zu erfüllen. Bis jetzt ist nicht klar, wie das Depot im Detail erklärt werden kann. Mit der Annahme, dass der Depotstrom homogen ist und sich zum Leckstrom addiert, können die beobachtete Korrelation zwischen Abb. 4.16 c) und Abb. 4.21 und die Antikorrelation zwischen Abb. 4.16 c) und Abb. 4.18 g) erklärt werden.

Zu Beginn dieser Art von Analyse war es umso überraschender, solch eine kleine zweite Harmonische zu finden als überhaupt eine zweite Harmonische, da nur unter Betrachtung von direkt generiertem lokalem Photostrom und Leckstrom „Current matching“ ein erheblicher Effekt sein sollte. Das Ladungsdepot-Modell mag für diese Diskrepanz eine einfache Erklärung sein.

4.4.3 Auswirkungen auf den CELLO-Aufbau

Für die korrekte Charakterisierung von nichtlinearen Wechselwirkungen auf Zellebene durch Analyse der zweiten Harmonischen ist es notwendig, jegliche störende nichtlineare Wechselwirkung des Messsystems zu vermeiden. Ein Aspekt war eine mechanische Vibration, induziert von einigen Lüftern zur Kühlung. Bevor diese Vibrationen durch eine spezielle Aufhängung eliminiert wurden, sah das Bild in Abb. 4.18 a) aus wie in Abb. 4.22, wo starke nichtlineare Wechselwirkungen als Linien deutlich zu erkennen sind. Die mechanischen Vibrationen des CELLO-Aufbaus führten zu nichtlinearen Wechselwirkungen während der Messung, da sich hierdurch die Schwerpunkte der Foki beider Laserstrahlen auf der Tandemzelle leicht verschoben haben (im μm -Bereich), d. h. beide Laserstrahlen lagen nicht immer perfekt übereinander. Mit einer verbesserten Aufhängung der Lüfter, die die sehr leichten Vibrationen der Lüfter nicht mehr so stark auf den CELLO-Aufbau überträgt, können jetzt Bilder der zweiten Harmonischen von ausreichender Qualität erzeugt werden. Im Anhang in Abb. C.1 ist der Komplettdatensatz mit mechanischen Vibrationen zu sehen. Deutlich sind die horizontalen Streifen auch in den Bildern der zweiten Harmonischen (z. B. in Abb. C.1 e)) zu erkennen. Abbildung C.2 im Anhang zeigt, dass Tandemsolarzellen für diese Untersuchungen notwendig sind, weil „Current matching“ durch Lüftervibrationen nichtlinear gestört werden kann, und somit Zellen mit „Current matching“ notwendig sind.

4.4.4 Fazit

CELLO-Messungen an a-Si/ μ -Si-Tandemsolarzellen geben konsistente Ergebnisse für konventionelle Messmodi mit einem scannenden Laser und verschiedenen Hintergrundbeleuchtungen und für den neuen Messmodus mit zwei simultan modulierten Lasern. Zusätzlich ist der zweite Messmodus schneller und ermöglicht die Extraktion nützlicher lokaler Informationen von nichtlinearen Prozessen über die Analyse der zweiten Harmonischen.

Für beide Teilzellen wurde der lokale Leckstrom genauso wie der lokale Photostrom vermessen, was die Identifizierung von verschiedenen Defekttypen ermöglichte und ihre Position im Schichtsystem der p-i-n-Übergänge.

Simultane Photostrommessungen zeigen, dass „Current matching“ für intensitätsmodulierte Messungen viel weniger limitierend ist als erwartet. Ein einfaches Ladungsdepot-Modell wurde vorgeschlagen, um dies zu erklären. Weitere Messungen, besonders mit Tandemsolarzellen anderer Konzepte, z. B. organische Solarzellen, sind notwendig, um zu überprüfen, ob das Ladungsdepot-Modell auch auf andere Tandem-Solarzellkonzepte anwendbar ist.

4.5 Einfluss der Oberfläche und prozessinduzierter Defekte auf Potential-induzierte Degradation und Regeneration

Die Ergebnisse dieses Abschnitts wurden auf der 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference EUPVSEC 2013 in Paris veröffentlicht [53]. Von einer Expertenjury wurde der Inhalt für so wichtig erachtet, dass er im Rahmen eines Vortrags vor großem Fachpublikum präsentiert werden durfte.

4.5.1 Degradationsvorgänge

Wie im Abschnitt 3.4.5 beschrieben, wurden 5 Solarzellen jeweils als Einzelzelle, im Minimodul integriert und nach Degradation und Regeneration im Detail untersucht. Die Kurvenanpassung an die globale Kennlinie, gemessen bei 1/3 Sonne, liefert Werte für den globalen Shunt (siehe Theorie-Abschnitt 2.1), wie sie für die 5 Solarzellen in den einzelnen Prozessierungsphasen in Abb. 4.23 gezeigt sind.

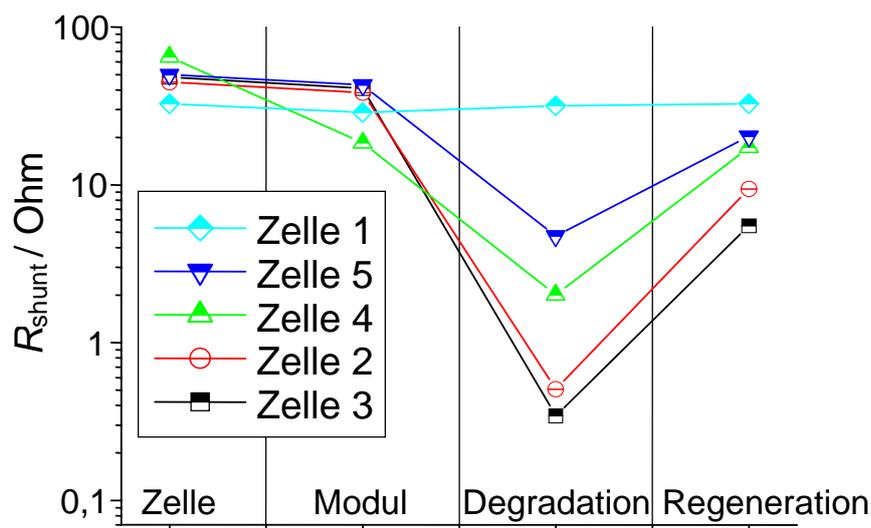


Abb. 4.23: Globale R_{shunt} -Werte des $I - V$ -Kennlinienfits bei 1/3 Sonne zeigen PID-Verhalten und eine Verbesserung nach der Regeneration.

Schon nach der Modulherstellung ist bei einigen Zellen ein leichtes Abfallen von R_{shunt} zu erkennen. Die Ursache für diese leichte Degradation wird in den nachfolgenden Abschnitten anhand von CELLO-Bilddaten diskutiert, sie kann aber klar unterschieden werden von der schweren Degradation, welche durch das Anlegen der hohen Spannung (PID Erzeugung) auftrat. Unterschiedliche Stärken von PID sind bereits in den integralen shunt-Werten sichtbar. Interessanterweise wurde keine vollständige Regeneration beobachtet, obwohl eine für Regeneration sehr lange Zeit mit inverser Spannung gewählt wurde. Eine Übersicht über die Messergebnisse befindet sich im Anhang von Abb. D.1 bis Abb. D.6. Aus Platzgründen werden hier nicht alle Ergebnisse gezeigt, aber es gibt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen dem Gesamtflächenanteil mit starken Verlusten

in den CELLO-Rasterbildern und dem (inversen) globalen shunt-Widerstand. Für weitere Details sind im Anhang von Abb. D.2 bis Abb. D.6 eine Übersicht aller Zellen mit den Ergebnissen der Standardauswertung nach Abschnitt 3.3.1 dargestellt: Abbildung D.1 zeigt die gemessenen Photostrombilder, in denen man schon Shuntverluste erkennen kann, und das daraus ermittelte Bild des Verhältnisses, in welchem stark verschuntete Bereiche in Rot zu sehen sind; die Shunts sind bei all diesen Bildern deutlich zu erkennen.

Als weiteres Beispiel zeigt Abb. 4.24 die Ergebnisse für eine der zwei Zellen mit der stärksten PID. a) und b) sind Quotientenbilder zwischen offener Klemmspannung und Kurzschlussstromrasterbildern. Dieser Quotient zeigt Verluste in Durchlaßrichtung (z. B. schlechte Dioden, hoher Serienwiderstand) als dunkle Flächen an [44]. Während vor der Modulfabrikation in Abb. 4.24 a) nur materialinduzierte Verluste aufgrund von starker Versetzungsdichte oder Korngrenzen sichtbar sind, sind nach der Modulfabrikation in Abb. 4.24 b) zusätzliche Serienwiderstandsverluste erkennbar. Abb. 4.24 d) zeigt eine lichtmikroskopische Aufnahme eines solchen Bereiches mit vergrößertem R_{SER} . Deutlich zu erkennen sind vom „Mainbusbar“ abgetrennte Gridfinger. Wie der Vergleich der Zellen im Anhang in Abb. D.6 verdeutlicht, ist dies ein häufig zu beobachtender Fehler, der bei manuellem Löten zur Herstellung der Minimodule entsteht.

Abbildung 4.24 c) zeigt Ergebnisse aus dem selben Bereich nach PID-Generation, es handelt sich hierbei um den Quotienten zwischen Photostrom unter negativer Vorspannung und dem Kurzschlussstrombild, wie in Abschnitt 3.3.1 beschrieben. Dieses Quotientenrasterbild ist das Standard-Rasterbild, um die Positionen von Shunts zu bestimmen [54] und ist nicht empfindlich auf Verluste des Serienwiderstandes. In Abb. 4.24 c) tauchen PID-Verluste in Rot auf. Obwohl eine gewisse Korrelation zwischen Abb. 4.24 b) und Abb. 4.24 c) zu sehen ist, gibt es starke Hinweise darauf, dass PID nicht direkt mit den Serienwiderstandsverlusten zusammenhängt, wie am anschließenden Beispiel diskutiert wird.

Abbildung 4.25 zeigt CELLO-Rasterbilder für Zelle 3, welche den kleinsten integralen Shuntwiderstand zeigt, also am stärksten von PID betroffen ist. Diese Zelle zeigt keine Anzeichen für eine Beschädigung durch die Modulherstellung, was schon ein erster Hinweis dafür ist, dass die abgetrennten Gridfinger nicht die direkte Ursache für die hier beobachtete PID sind. Eben weil diese Zelle keine durchbrochenen Gridfinger aufgrund des Herstellungsprozesses zeigt, wurde sie für die Untersuchung der Material-induzierten PID-Effekte ausgewählt. Abbildung 4.25 b) zeigt Bereiche mit starkem PID in Rot. Der Vergleich mit dem Kurzschlussstrombild in Abb. 4.25 a) offenbart eine gute Korrelation mit Bereichen mit hoher Versetzungsdichte. Um den Leser an dieser Stelle nicht auf die falsche Fährte zu führen, sei betont, dass die CELLO-Ergebnisse keinen Hinweis darauf liefern, dass die Rekombinationsaktivität der Versetzungsnester direkt mit dem PID gekoppelt ist. Es ist sehr offensichtlich, dass fast alle Bereiche mit starkem PID parallel zu den Gridfingern orientiert sind. Mit der Vergrößerung dieser Bilder kann man genau bestimmen, dass die PID-Bereiche nicht symmetrisch um die Gridfinger angeordnet sind (was der Fall sein würde, wenn Serienwiderstände, z. B. induziert durch gebrochene Gridfinger, PID verursachen würde), sondern immer zwischen den Gridfingern liegen. Das heißt ein Gridfinger begrenzt in allen Fällen die PID-Bereiche. Dies ist auch gültig für die PID-Bereiche auf Zelle 2 in Abb. 4.24 c).

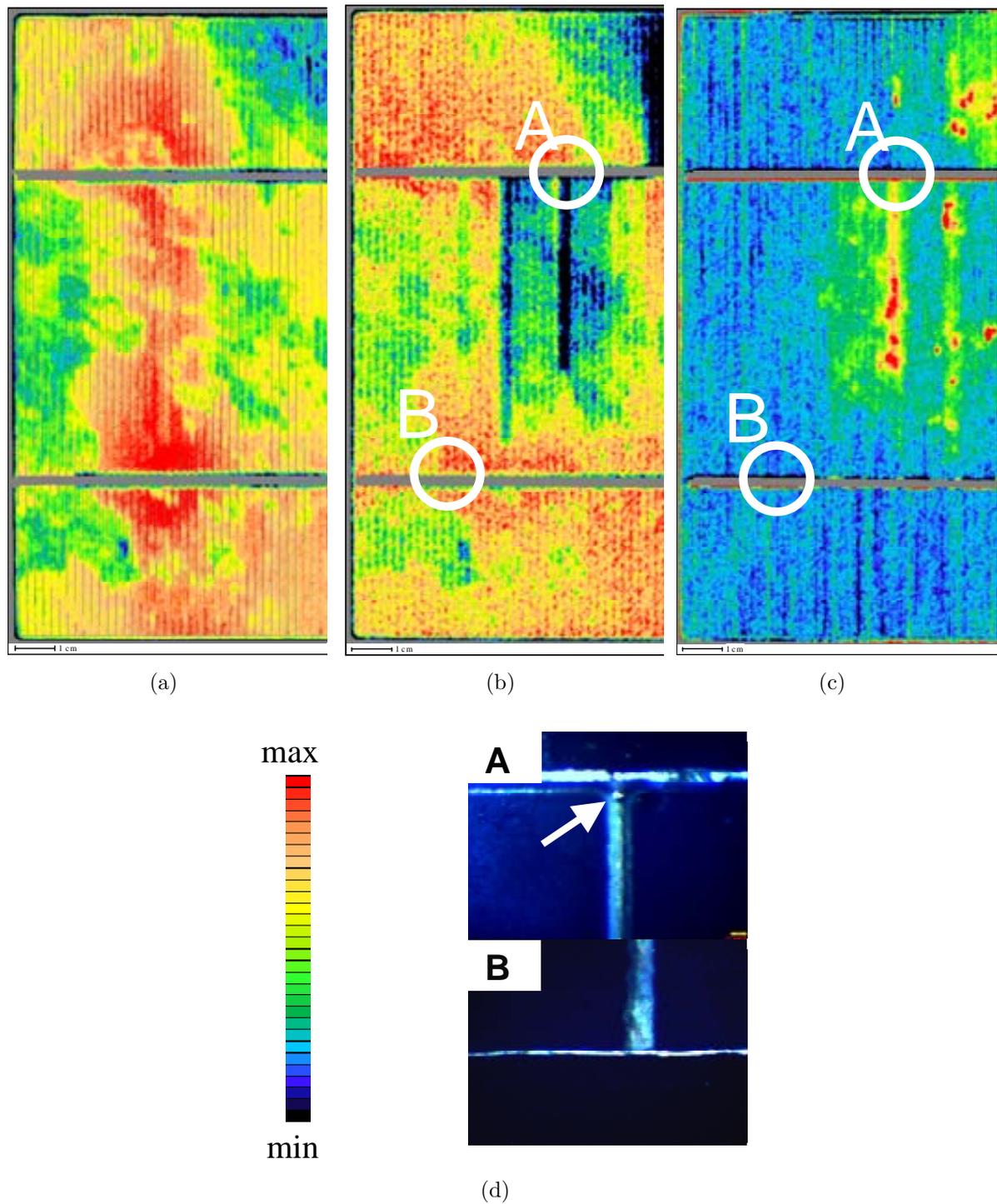


Abb. 4.24: Verhältnis von CELLO-Bildern von Zelle 2 mit starkem PID: a) vor Modulproduktion (Calc4: Spannungsbild bei offener Klemmspannung geteilt durch den Strom bei Kurzschluss), b) nach Modulproduktion (Calc4: Spannungsbild bei offener Klemmspannung geteilt durch den Strom bei Kurzschluss), c) nach PID (Photostrombild bei -300 mV geteilt durch das Kurzschlussstrombild). d) Aufnahmen des optischen Mikroskops durch das Modulglas hindurch bei Flächen A und B, wie in c) markiert, wo einzelne Gridfinger den Busbar erreichen. Die Farbskala gilt für alle CELLO-Bilder in diesem Abschnitt.

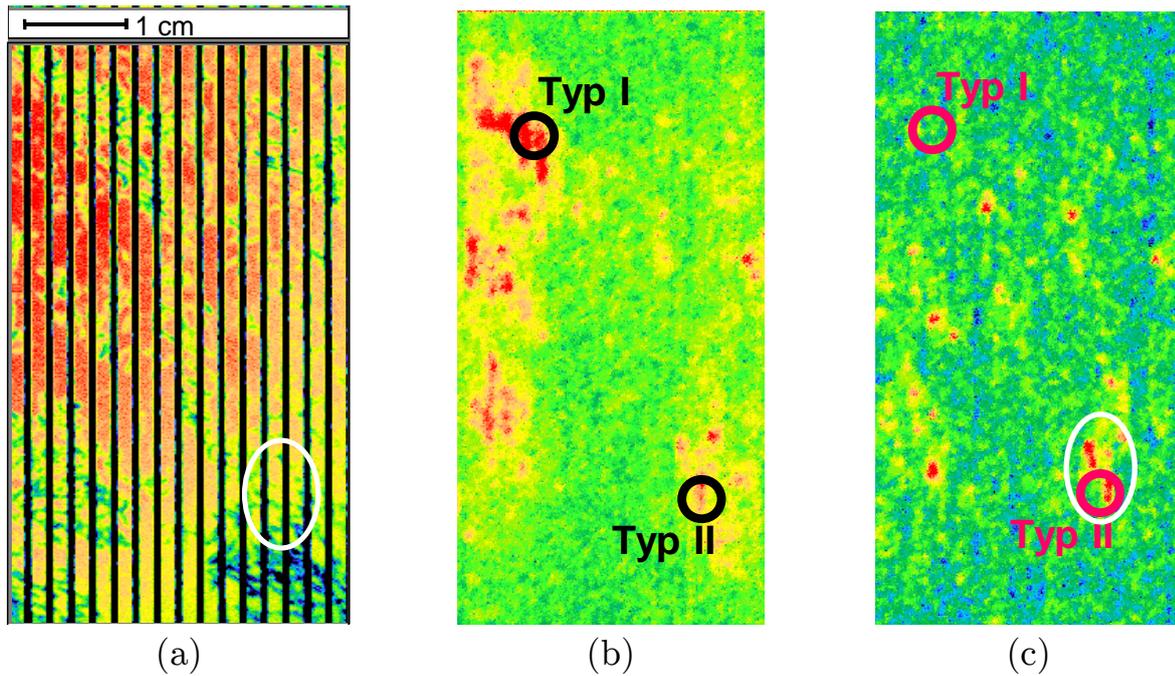


Abb. 4.25: CELLO-Bilder von Zelle 3 mit starkem PID. a) Kurzschlussstrom nach Modulproduktion. b), c) Verhältnis von zwei CELLO-Strombildern (-300 mV geteilt durch das Kurzschlussstrombild), b) vor und c) nach der Regeneration; rote Flächen markieren Bereiche mit starkem PID.

4.5.2 Regenerationsvorgänge

Abbildung 4.25 c) zeigt für Zelle 3 den Quotienten des Kurzschlussstroms (nach Regeneration geteilt durch vor Degradation). Rote Bereiche markieren somit Stellen, die nicht durch Anlegen einer negativen Spannung regeneriert werden konnten. Deutlich erkennt man beim Vergleich der Bilder Abb. 4.25 a) und Abb. 4.25 c) eine starke Korrelation mit Bereichen mit Korngrenzen. Diese Ausprägung von PID wurde von uns in die Literatur als Typ II eingeführt und wird dementsprechend auch in dieser Arbeit so bezeichnet. Demgegenüber lassen sich PID-Typ I-Defekte durch die Regenerationsprozedur wieder ausheilen. Ein Beispiel einer Zelle mit sehr vielen Typ I-Defekten ist in Abb. 4.26 a) gezeigt. Es handelt sich um Zelle 4, die nach Abb. 4.23 sehr viele PID-Shunts enthält. In Rot sind die Bereiche erhöhter Shuntichte gezeigt. Nach Regeneration sind alle diese Shunts nicht mehr sichtbar (siehe Abb. D.2 im Anhang). Das Gebiet, welches in Abb. 4.26 a) durch das Rechteck markiert ist, wurde in höherer Ortsauflösung nochmals vermessen, wie in Abb. 4.26 c) und d) gezeigt. Deutlich ist zu erkennen, dass die Shunts auf rechteckigen Flächen und entlang senkrecht angeordneter Linien liegen. Diese Strukturen korrelieren nicht mit der Defektstruktur des Wafers. Nur in wenigen markanten, sehr rot erscheinenden Bereichen gibt es eine Korrelation zu Versetzungsnestern. Dies ist beim Vergleich von Abb. 4.26 b) mit Abb. 4.26 c) zu erkennen. Diese Strukturen stehen sehr offensichtlich in Beziehung zum Herstellungsprozess. Abbildung 4.26 d) ist das Kurzschlussstromrasterbild von der Solarzelle mit Verkapselung, aufgenommen nach dem Regenerationsschritt. Die roten Punkte, die deutlich in diesem Bild zu erkennen sind, wurden bisher nie bei Solarzellen ohne EVA und Glasverkapselung beobachtet. Als Beispiel ist in Abb. 4.26 b) das Kurzschlussstromrasterbild von dem gleichen Bereich dieser Solarzelle ohne Verkapselung

gezeigt, aufgenommen wurde dieses mit einer größeren Laserfokusgröße als in Abb. 4.26 d), was für diesen Vergleich nicht relevant ist. Zu sehen ist das typische, viel homogenere Photostrombild der Solarzelle.

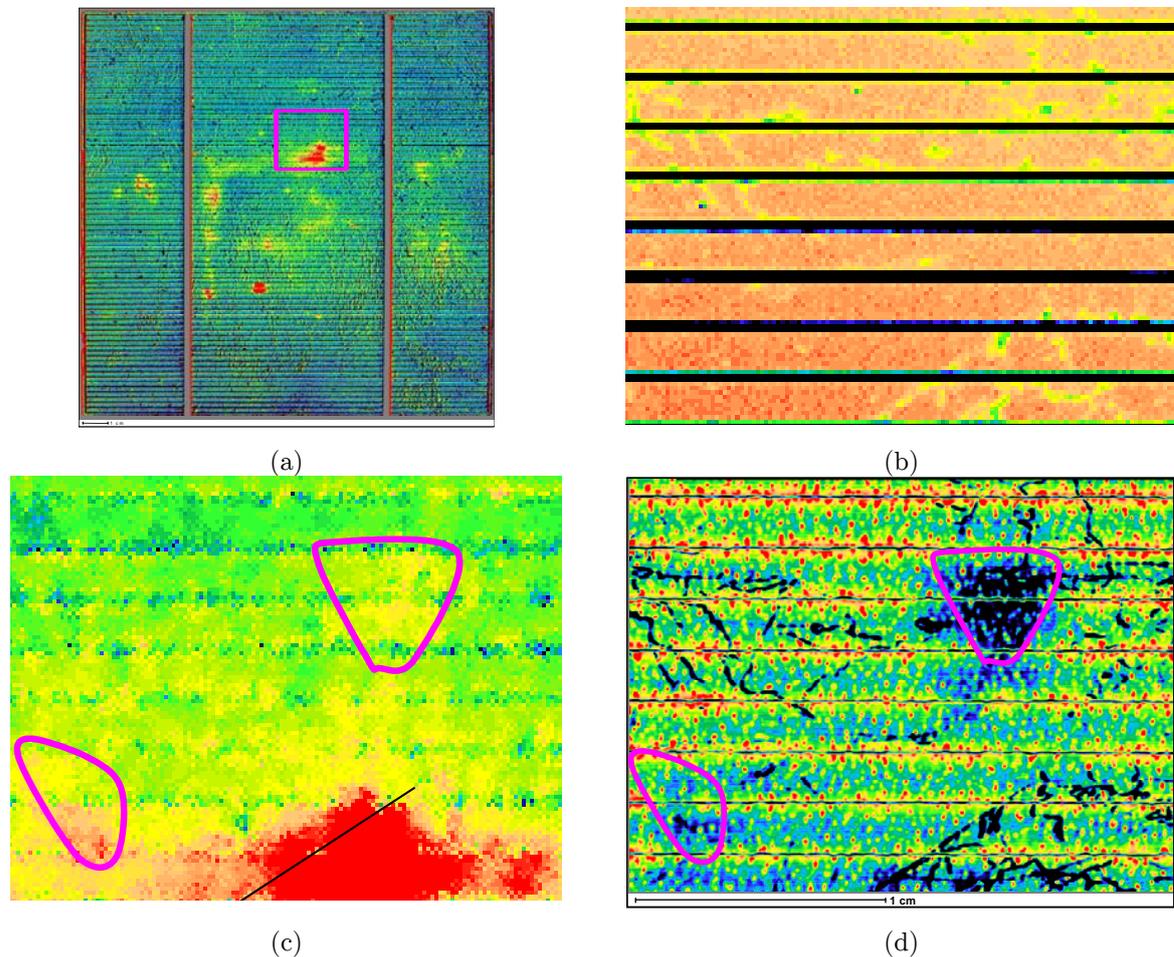


Abb. 4.26: CELLO-Bilder von Zelle 4 mit starkem PID: Verhältnis von Kurzschlussstrombild vor der Degradation geteilt durch nach der Degradation, mit von PID-betroffenen Bereichen in Rot: a) komplette Zelle und c) von dem Bereich markiert in a), die schwarze Linie in c) dient als Orientierungshilfe (Details siehe Text). d) Kurzschlussstrombild von der gleichen Modulfläche nach der Regeneration. b) Zum Vergleich Kurzschlussstrombild der Zelle als solches (vor der Modulfabrikation) für die gleiche Fläche wie in d).

Offensichtlich ist in Abb. 4.26 d) die Dichte von roten Punkten viel höher in der Nähe der Gridfinger ist. Es ist nahezu sicher, dass die Dichte an roten Punkten ein direktes Maß für den Anpressdruck der EVA-Folie auf die Solarzelle ist. Aufgrund der intrinsischen Rauigkeit der EVA-Folie steigt wahrscheinlich die optische Transparenz, wenn der Kontakt zu der Solarzelle besser wird. Abbildung 4.26 c) zeigt den gleichen Quotienten wie Abb. 4.26 a), nur anderes skaliert, um die gute Antikorrelation zwischen der Dichte der roten Punkte in Abb. 4.26 d) mit der PID-Stärke besser sichtbar zu machen (vgl. die markierten Bereiche in Abb. 4.26 c), d)). Kombiniert man das lokal schlechte Anhaften der EVA-Folie in Abb. 4.26 d) mit der Geometrie der Bereiche, in denen PID und somit

schlechtes Anhaften beobachtet wird (Abb. 4.26 a)), so liegt die Vermutung nahe, dass Fehler im Laminierungsprozess zu der schlechten Anhaftung führen und somit Typ I-PID induzieren. Der Vergleich der Bilder Abb. 4.26 c) und Abb. 4.26 d) zeigt, dass sich im Bereich mit stärkstem PID auch stark rekombinationsaktive Versetzungen befinden. Linien mit hohen Versetzungsdichten begrenzen geradezu die Bereiche mit PID, ebenso wie Gridfinger die Bereiche begrenzen. Eine Grenze des PID-Bereichs ist fast perfekt parallel zur Korngrenze ausgerichtet, sie decken sich aber nicht. Es ist wohlbekannt, dass verschiedene Körner, genauso wie Bereiche mit hoher Versetzungsdichte, bei mc-Si-Solarzellen zu einer reduzierten Zelldicke führen können, hervorgerufen durch einen chemischen Ätzschritt zu Beginn des Zellprozesses. Die vergrößerte chemische Auflösungsrate, welche oft in Bereichen mit vergrößerter Volumen-Rekombination gefunden wird, führt zu einer erhöhten Ätzrate, was auch erklären kann, wieso der Kontakt zwischen EVA-Folie und Solarzelle sogar noch schlimmer in diesen Gebieten ist. Die gleiche Erklärung dürfte für die PID-Bereiche in Abb. 4.25 b) gelten, welche als Typ I gekennzeichnet sind.

Die gleiche Erklärung, dass Unebenheiten auf der Solarzelle Typ I-PID erzeugen können, kann auch auf die Ergebnisse in Abb. 4.24 angewendet werden. Hier befinden sich die meisten PID-Bereiche nah am oberen „Mainbusbar“. Eine Analyse mit dem Mikroskop offenbarte zusätzlich zu einigen abgetrennten Gridfingern auch Artefakte aus dem Lötprozess. Der weiße Punkt, der durch einen Pfeil in Abb. 4.24 d) markiert ist, Teil A, ist ein abgesetzter Metallpartikel, welcher an den „Mainbusbar“ gelötet wurde, und welcher dem Modulglas in diesem Gebiet nicht erlaubt, die EVA-Folie homogen und gleichmäßig auf die Solarzelle zu pressen.

4.5.3 Einfluss der EVA-SiN-Grenzfläche

Abbildung 4.27 fasst die experimentellen Befunde noch einmal zusammen, welche zu einer „Lücke“ zwischen EVA-Folie und Solarzelle führen können, was als möglicher Grund für PID vom Typ I identifiziert wurde. Dies kann durch die Dichte an roten Punkten überprüft werden, wie in Abb. 4.26 d) gezeigt: Die hohe Dichte an roten Punkten um die zwei Gridfinger herum im obersten Bereich von Abb. 4.26 d) kann interpretiert werden als nahezu perfekte Versiegelung der Fläche zwischen den zwei Gridfingern. Falls (wie es früher schon vorgeschlagen wurde [55], siehe Abschnitt 2.8) Wasserdampf in das PID-Bildungsschema einfließt, kann diese fast perfekte Versiegelung den Transport von Wasserdampf auf der Solarzelle zu dem Gebiet zwischen den zwei Gridfingern limitieren und somit auch die PID-Bildung auf diesem Bereich limitieren. Dies kann die längliche Form und die Begrenzung durch Gridfinger erklären, welche für fast alle PID-Gebiete dieser Untersuchung gefunden wurden.

In [56] wird beschrieben, dass Natriumionen bei einem Spannungsabfall von etwa 5 V über der AR-Beschichtung durch diese getrieben werden. Die Natriumionen sind dann die Ursache von PID, wenn sie in Defekte im Emitter eindiffundieren. Ein guter Kontakt der EVA-Folie mit der AR-Schicht kann aufgrund der Querleitfähigkeit der EVA-Folie dann eine Potentialdifferenz genügend stark abbauen, so dass kein PID auftritt. Weil ein ohmscher Kontakt durch das Metallisierungsfeuern der Gridfinger durch die AR-Beschichtung auf den Emitter erzeugt wird, kann kein Spannungsabfall über der AR-Schicht direkt unterhalb des Gridfingers existieren, d. h. kein PID sollte nach dieser Erklärung hier möglich sein. Wenn der Quertransport von Natriumionen durch die EVA-Folie leichter ist als durch die dielektrische AR-Schicht, dann dürfte ein enger Kontakt der EVA-Folie zu bei-

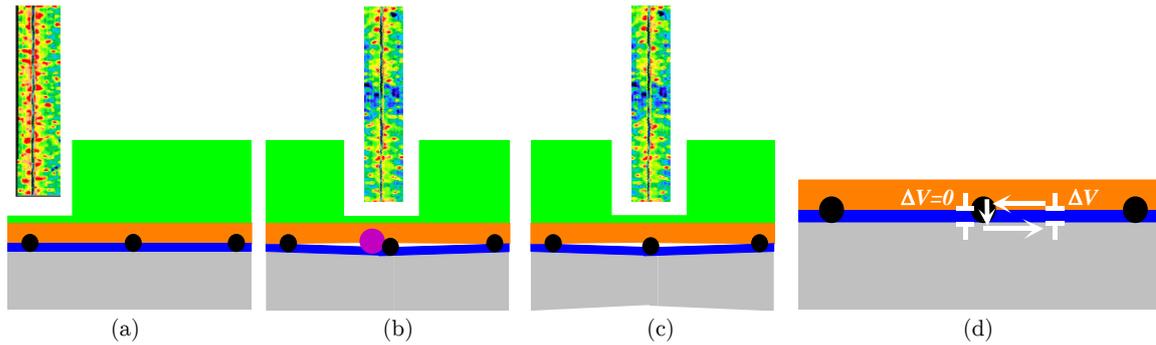


Abb. 4.27: Illustration der Modul-Sandwich-Struktur aus Glas (grün), EVA-Folie (orange), Gridfinger (schwarz), SiN (blau) und Si (grau). a) Normalfall mit ausreichendem EVA-SiN-Kontakt, b) und c) fehlerhafter EVA-SiN-Kontakt, verursacht von verschiedenen lokalen Drücken in der Laminierung, induziert durch Partikeleinschluss b) oder reduzierte Zelldicke c). Oberer Bildrand in a)–c): CELLO-Bild nach Abb. 4.26 d), das dem darunter abgebildeten Gridfinger entspricht. d) Der Spannungsabfall ΔV über dem SiN wird reduziert zu 0 V am Gridfinger.

den, den Gridfingern und der Fläche zwischen diesen, dabei helfen, den Spannungsabfall zu reduzieren, welcher notwendiger Treiber von PID ist. Dies ist schematisch illustriert in Abb. 4.27 d). Natürlich könnte jede Art von elektrisch leitfähiger Schicht diese Aufgabe übernehmen. Um PID zu überwinden, wäre es also nicht notwendig, die Leitfähigkeit der gesamten AR-Schicht zu erhöhen, was auch Nachteile für die optischen Eigenschaften der AR-Schicht hätte.

4.5.4 Fazit

Es wurde gefunden, dass von PID betroffene Gebiete zwischen Gridfingern liegen. Es gibt große Flächenanteile, genannt Typ I, mit nahezu kompletter Regeneration. Die meisten von PID betroffenen Gebiete sind von diesem Typ. Außerdem gibt es viel kleinere Typ II-Gebiete, bei denen PID punktwise auftritt, und welche nicht komplett regeneriert werden können. Alle Typ-II Punkte in dieser Untersuchung befinden sich an Korngrenzen.

Es gibt eine allgemeine Korrelation zwischen von PID betroffenen Bereichen und Bereichen mit verringertem mechanischem Kontakt zwischen EVA-Folie und SiN-Schicht, wie sie bei CELLO-Kurzschlussstrommessungen vom Modul oder bei einer optischen Mikroskopuntersuchung gemessen wurde. So ein reduzierter mechanischer Kontakt zwischen EVA-Folie und SiN-Schicht kann bedingt durch Partikeleinschluss oder durch eine lokal reduzierte Zelldicke (z. B. in Bereichen mit hoher Versetzungsdichte) sein.

Im Ganzen zeigen diese Befunde, dass (i) der Laminierungsprozess selbst PID in Bereichen verstärken kann, in denen ein nicht perfekter mechanischer Kontakt zwischen EVA-Folie und Solarzelle vorherrscht, und dass (ii) dies von der Oberflächentopologie der Solarzelle beeinflusst werden kann, was in einigen Zellbereichen in Beziehung zu Materialeigenschaften steht.

Ein Modell für das (Nicht-)Auftreten von PID wird vorgeschlagen, welches die Auswirkungen des Spannungsabfalls über der AR-Schicht berücksichtigt, der notwendig ist, um die shunterzeugenden Natriumionen durch die AR-Schicht zu treiben und der am Grid-

finger kurzgeschlossen wird; dieses Modell kann konsistent alle experimentellen Befunde dieser Untersuchung erklären.

Kapitel 5

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden viele verschiedene Solarzellen (-typen) charakterisiert. Die dafür notwendigen Änderungen in der CELLO-Hard- und Software (z. B. Kontaktierung oder konfokale Laseranordnung) ermöglichten die Vermessung neuer Solarzellentypen und neuer Solarzellenparameter.

Effekte mechanischer Verspannung bei Standard-Solarzellen CELLO-Messungen, welche einen tief eindringenden Laser (934 nm Wellenlänge, 50 μm Eindringtiefe) verwenden, zeigten Bereiche mit signifikant erhöhter Phasenverschiebung, welche nicht im entsprechenden Rasterbild des roten Lasers zu erkennen sind. Diese Bereiche zeigten einen signifikant reduzierten Photostrom nur für tief eindringende Laser. Messreihen von CELLO-Messungen an lokal mechanisch verspannten Solarzellen (z. B. durch Biegen der Zelle) zeigten, dass besonders die Phasenverschiebung des Photostroms besonders empfindlich auf mechanische Verspannung reagiert. Dies ist ein starker Hinweis darauf, dass die eben genannten Strukturen in Beziehung zu prozessinduzierten mechanischen Verspannungen in Solarzellen stehen. Ein Modell wurde diskutiert, welches Änderungen der Laser-Eindringtiefe, die durch mechanische Verspannung induziert und wellenlängenabhängig sind, spannungsinduzierten Änderungen der Siliziumbandlücke zuordnet. Das heißt die Änderung der Gitterabstände im Silizium durch eine angelegte mechanische Verspannung ändert das Absorptionsverhalten im langwelligen Bereich nah der Bandlücke. Dies ermöglichte die komplette Kurvenanpassung von 16 CELLO-Rasterbildern, um lokale Werte der relativen Änderung der Bandlücke als Messgröße für lokale mechanische Verspannung zu extrahieren. Die entsprechenden Ergebnisse wurden auf nahezu allen mono- und mc-Si-Solarzellen dünner als 250 μm gefunden. Mehrere Beispiele wurden präsentiert. Das neue Wissen um die Auswirkungen mechanischer Verspannung erlaubt es, andere Messmethoden zu verfeinern (IQE-Messungen) und auch die vorhandene CELLO-Hardware zu verbessern. So konnte z. B. die CELLO-Kontaktierungseinheit verbessert werden, weil die Messung mechanischer Verspannung möglich war. Vor der Industrie, sowie vor der PV-Fachwelt (Fraunhofer CSP) stießen die Ergebnisse auf positive Resonanz und starkes Interesse.

Inhomogenitäten durch Co-Feuern bei Standard-Solarzellen Alle Modifikationen des Zellprozesses, z. B. Änderung der Front- oder Rückseitenpaste oder des Schichtwiderstandes, benötigen üblicherweise eine lange und teure Anpassung des Co-Feuerprozesses (typischerweise Bandgeschwindigkeit und T_p) oder sogar eine Verstellung des gesamten

Zellprozesses, weil statistisch relevante Verbesserungen des Wirkungsgrads für die Optimierungsroutine verwendet werden. Es wurden CELLO-Messungen verwendet, um lokale Bilder der Volumenlebensdauer τ_{life} , der Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit auf der Rückseite S_b und des Serienwiderstandes R_{SER} zu erzeugen. Für eine systematische Optimierung des Co-Feuerns mit verschiedenen Feuereinstellungen wurden ungefähr 40 multikristalline Zellen von benachbarten Wafern durch mehr als 1500 CELLO-Bilder überprüft. Die Ergebnisse und Strategien für eine effiziente Prozessoptimierung wurden diskutiert. Zum Vergleich: Für eine ebenso tiefe Charakterisierung in der Industrie benötigt man wahrscheinlich eine Anzahl an Zellen in 10.000er Größenordnung, um statistisch relevante Ergebnisse zu erzielen, wobei aber üblicherweise nicht so große Parametervariationen möglich sind. Für Institute mit einer kleinen Versuchslinie mit extremen Parametervariationen sind solche großen Probenzahlen aber nicht möglich, sondern hier ist die von uns angewendete sehr genaue Charakterisierung maßgebend. Zusätzlich zu der hier gezeigten Auswertung wurden auch noch viele Photoimpedanzmodelle entwickelt, welche in der Zukunft zur Verfügung stehen werden, um die wesentlichen Merkmale zukünftiger Zellkonzepte zu verstehen und zu erfassen.

Charakterisierung rückseitig passivierter Zellen mit „Parasitic shunting“ Multikristalline Si-Solarzellen ($120\ \mu\text{m}$ dick) mit einer Rückseitenpassivierung durch eine SiO/SiN-Schicht und Al-Punktkontakten werden lokal mit der CELLO-Technik charakterisiert. Durch die Kombination verschiedener Standardmessmodi, z. B. Benutzen verschiedener Laserwellenlängen, Änderung der Intensität der Hintergrundbeleuchtung und bei Messung an verschiedenen Punkten entlang der IV-Kennlinie, ist es nun möglich, die Effekte von „Parasitic shunting“ von anderen Rückseiten-Effekten wie inhomogene Oberflächenpassivierung (z. B. durch die SiO/SiN-Schicht oder die Punktkontakte) oder Serienwiderstand zu separieren. Als unerwartete Wechselwirkung wurde gefunden, dass ein erhöhter Serienwiderstand auf der Rückseite das Rückseitenrekombinationsverhalten verbessert und somit den Photostrom verstärkt. Dies führte zu dem Schluss, dass die Serienwiderstandsverteilung der Rückseite für eine korrekte Interpretation von Photostromdaten, gemessen bei großen Wellenlängen, mit berücksichtigt werden muss.

Charakterisierung von Tandemsolarzellen In diesem vierten Abschnitt wurde die CELLO-Technik für die lokale Charakterisierung von a-Si/ μ -Si-Tandemsolarzellen verwendet. Durch Verwendung eines blauen und eines infraroten Lasers in einem konfokalen Strahl mit verschiedenen Modulationsfrequenzen der Lichtintensitäten können die Zellen hinsichtlich des lokalen „Current matching“ analysiert werden. Die Kombination dieser Daten mit z. B. der Antwort der zweiten Harmonischen, d. h. die lokale nicht lineare Wechselwirkung des Kurzschlussphotostromes, generiert von den beiden Lasern, ermöglicht die Analyse von zusätzlichen lokalen Eigenschaften wie die Diodencharakteristik (Leckströme) von beiden Teilzellen oder lokale Serienwiderstände. Mehrere Beispiele für die Bestimmung von lokalen Defekten durch die Kombination von CELLO-Bildern wurden diskutiert. Die Messung der zweiten Harmonischen spielt auch zukünftig in der effizienten Analyse neuer Solarzellenkonzepte eine wesentliche Rolle. Sie erlaubt die schnelle Messung von Nichtlinearitäten, was z. B. Defektklassifizierungen ermöglicht oder das Auffinden von Messfehlern, z. B. durch Fehlbedienung des Potentiostaten.

Untersuchungen von PID und Regeneration bei Minimodulen Es ist wohlbekannt, dass die Zusammensetzung der Siliziumnitrid-Antireflexbeschichtung sowie die Wahl der EVA-Folie drastisch Potential-induzierte Degradation (PID) beeinflusst. Hier wurden experimentelle Ergebnisse präsentiert und diskutiert, die darauf hinweisen, dass der Laminierungsprozess selbst und die Oberflächentopologie der Solarzelle auch PID fördern können. Ein Modell, welches die experimentellen Ergebnisse erklären kann, wurde vorgestellt: Der Spannungsabfall über der AR-Schicht, welcher notwendig ist, um die shunterzeugenden Natriumionen durch die AR-Schicht zu treiben, wird durch die Zelltopologie sowie von dem mechanischen Kontakt zwischen EVA-Folie und SiN-Schicht bestimmt. Aus diesen Erkenntnissen lassen sich z. B. Ideen ableiten, PID zu vermeiden, z. B. durch Auftragen einer elektrisch leitfähigen Schicht auf der Zelloberseite.

CELLO Hard- und Software Verbesserungen Die hier durchgeführten Messungen führten zu einer ganzen Reihe von Verbesserungen von Hard- und Software:

- Zellkontaktierung: Anpassung an unterschiedliche Zelltypen und Vermeidung extrinsischer mechanischer Verspannung.
- Konfokale Laserpositionierung ermöglicht Photoimpedanzanalysen und erstmals Messungen an Tandemsolarzellen.
- Ein viel besseres Signal-zu-Rausch-Verhältnis ermöglicht schnellere und genauere Messungen.
- Eine effektivere Datenanalyse wird durch die Verwendung der zweiten Harmonischen ermöglicht.

Die Messergebnisse haben bewiesen, dass die CELLO-Technik flexibel und effektiv genutzt werden kann, um verschiedenste Solarzellentypen zu charakterisieren, und somit einen Beitrag zur Verbesserung von Solarzellen (-konzepten) ermöglicht.

Anhang A

Beispieldatensätze

A.1 Illustration: hohe Orstauflösung

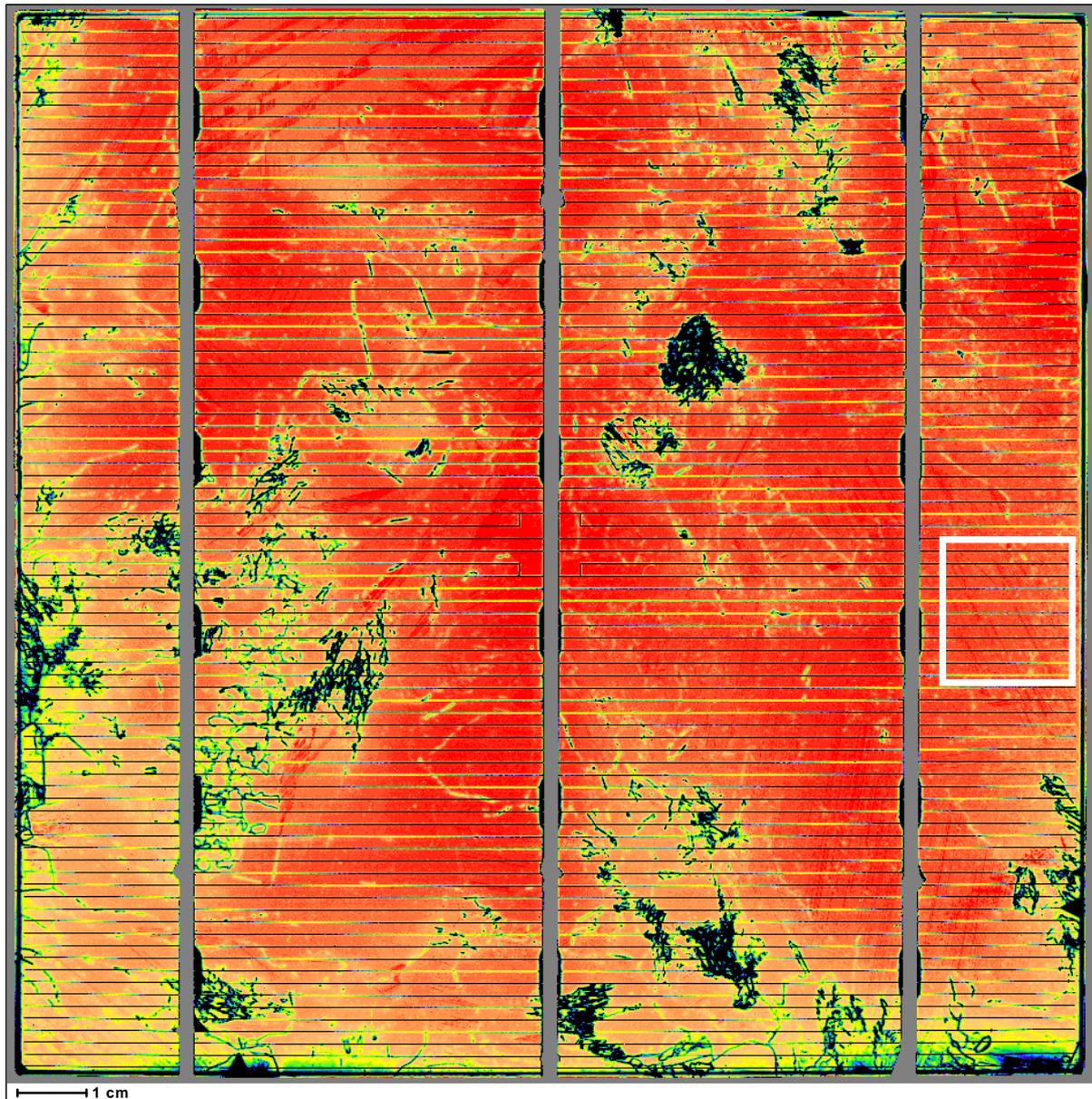


Abb. A.1: Photostrom-Amplitudenbild zur Demonstration der großen Ortsauflösung von Standard-Bildern, hier mit einer Auflösung von $941 \text{ Pixel} \times 941 \text{ Pixel}$. Die meisten CELLO-Bilder haben diese große Auflösung, welche bei der Darstellung als kleines gedrucktes Bild oft nicht zur Geltung kommt.

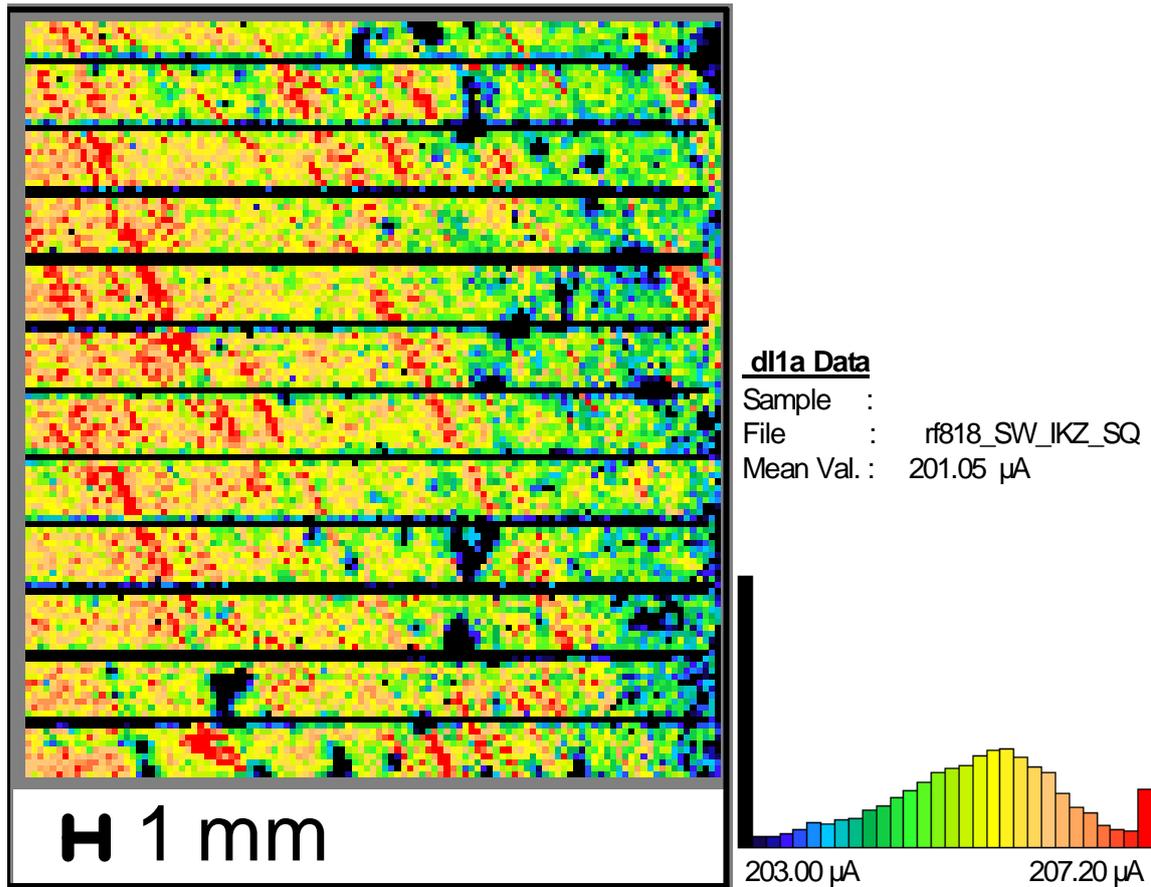


Abb. A.2: Zoombild des weißmarkierten Rechtecks in Abb. A.1 mit anderer Histogrammskalierung, wodurch deutlich mehr Dynamik sichtbar wird und somit lokale Reflektivitätsunterschiede erkennbar werden, welche in Abb. A.1 nicht zu sehen waren.

A.2 Standard-Modus: Mess- und Auswertedatensatz

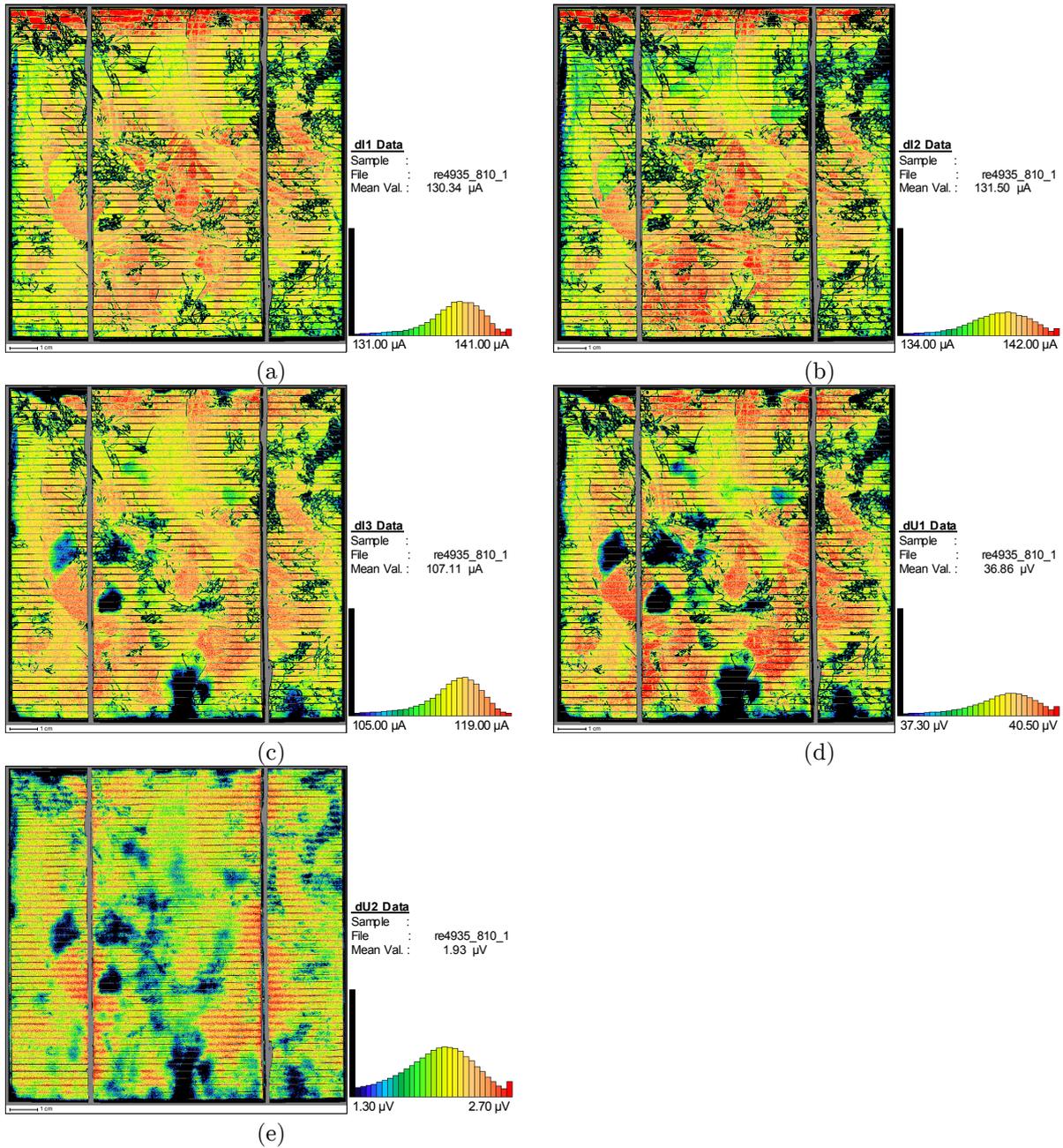


Abb. A.3: Amplitudendaten einer CELLO-Messung im Standard-Modus, beschrieben in Abschnitt 3.3.1. Hierbei wurde eine kommerzielle multikristalline Si-Solarzelle mit dem IR-Laser vermessen.

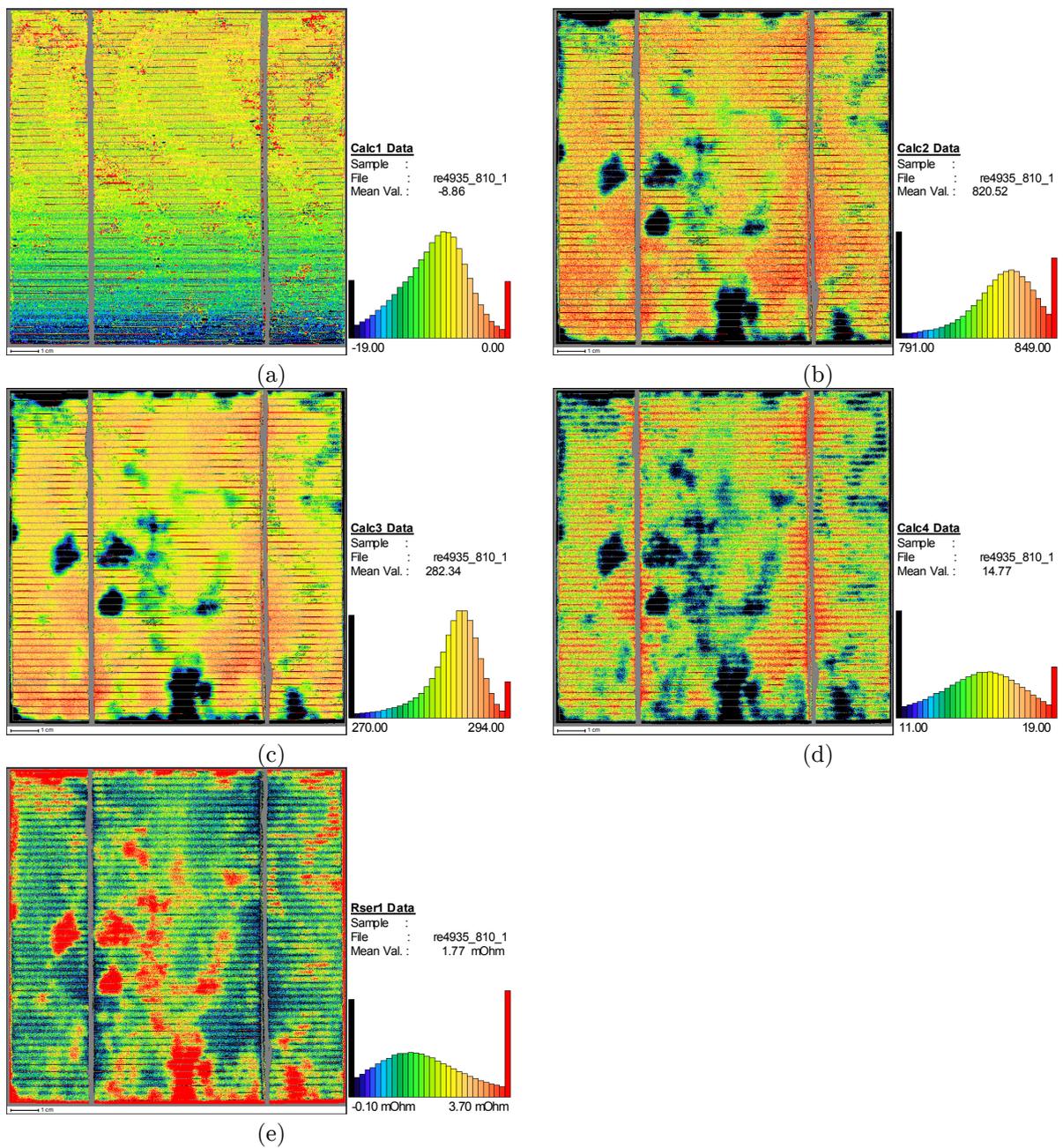


Abb. A.4: Datensätze einer typischen Auswertung einer Messung im Standard-Modus wie beschrieben in Abschnitt 3.3.1. In a) sind keine nennenswerten ohmschen Shunts zu sehen. Die schwarzen Flächen in b) und c) sind Leistungsverluste an Stellen, an denen die metallischen Frontkontakte nicht ausreichend durch die SiN-Schicht gefeuert werden konnten. Diese Stellen leuchten auch im Serienwiderstandsbild e) rot auf.

A.3 Photoimpedanzmessungen

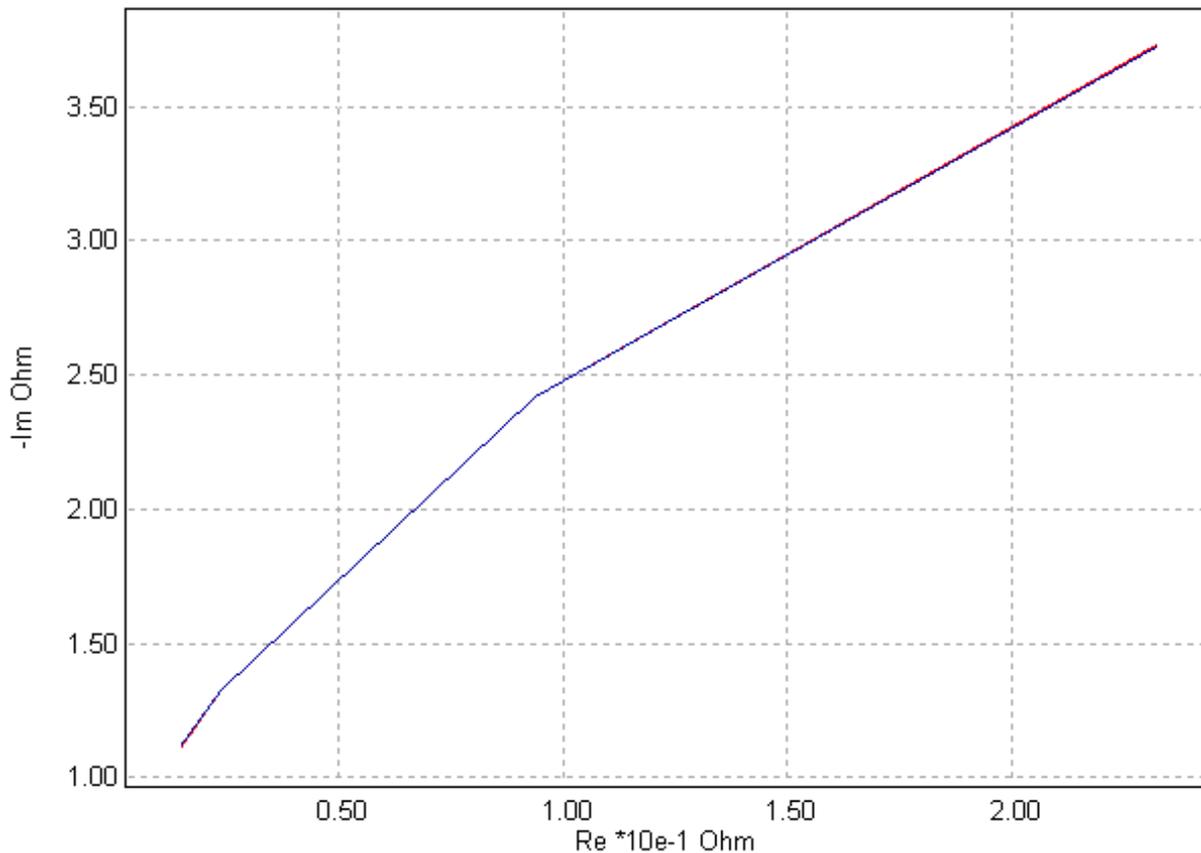


Abb. A.5: Globale Zellimpedanz $Z(\omega)$ für eine kommerzielle multikristalline Si-Solarzelle. Die blaue Linie verbindet die vier Messpunkte von den vier vermessenen Frequenzen miteinander. Die rote Linie beschreibt die Anpassung der Messdaten an ein Ersatzschaltbild, welches für die Impedanz verwendet wird. Man erkennt eine sehr gute Übereinstimmung.

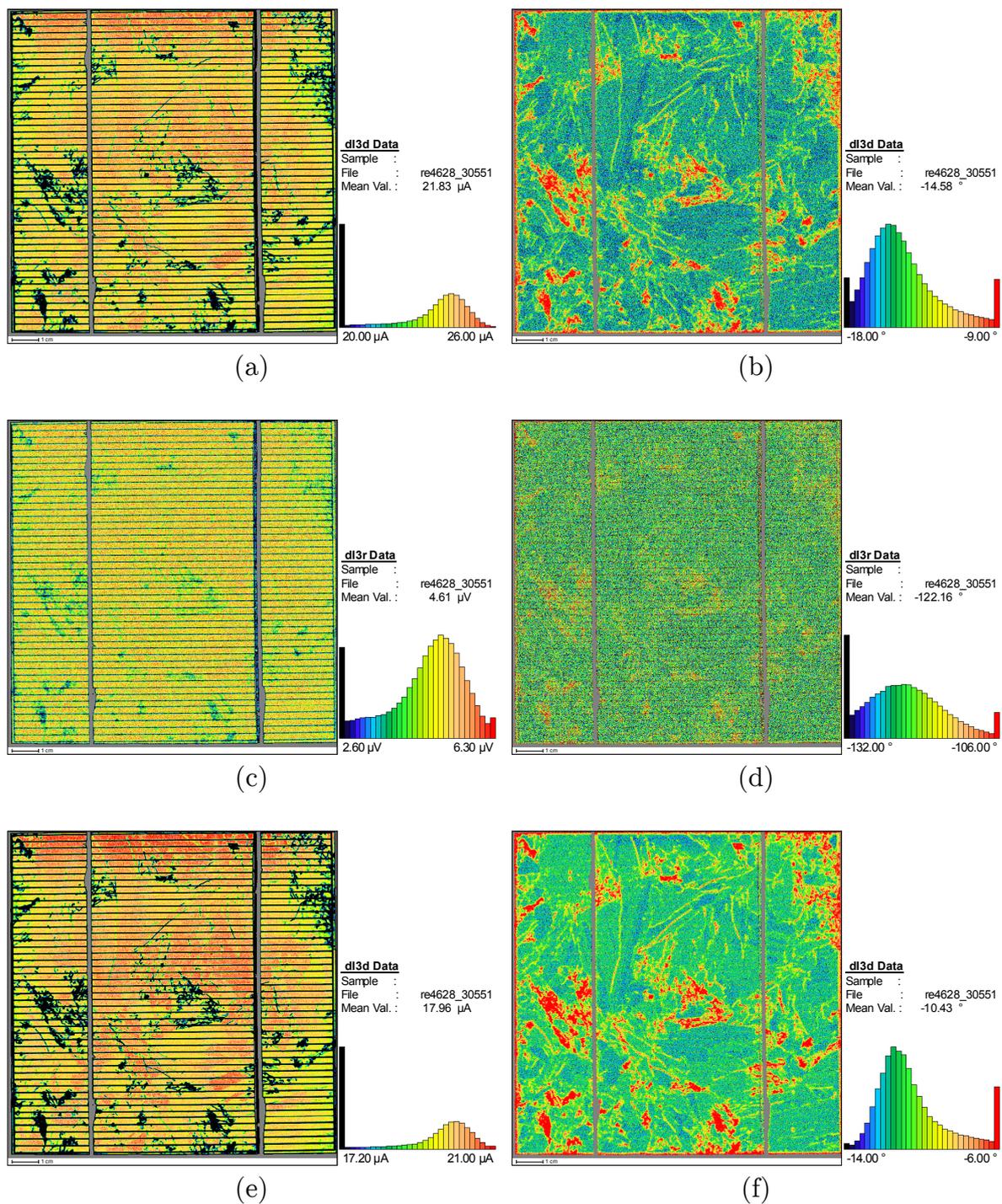


Abb. A.6: Beispielhafte Stromkorrektur für eine multikristalline-Si-Solarzelle, gemessen mit dem SIR-Laser bei der höchsten Frequenz mit Benennung nach Tabelle 3.2: a) Amplitude und b) Phasenverschiebung von $dI(\omega)$. c) Amplitude und d) Phasenverschiebung von $dU(\omega)$. e) Amplitude und f) Phasenverschiebung von $dI_{\text{corrected}}(\omega)$. Anhand des sich stark ändernden Mittelwerts ist der große Einfluss dieser Korrektur bei hohen Frequenzen ersichtlich.

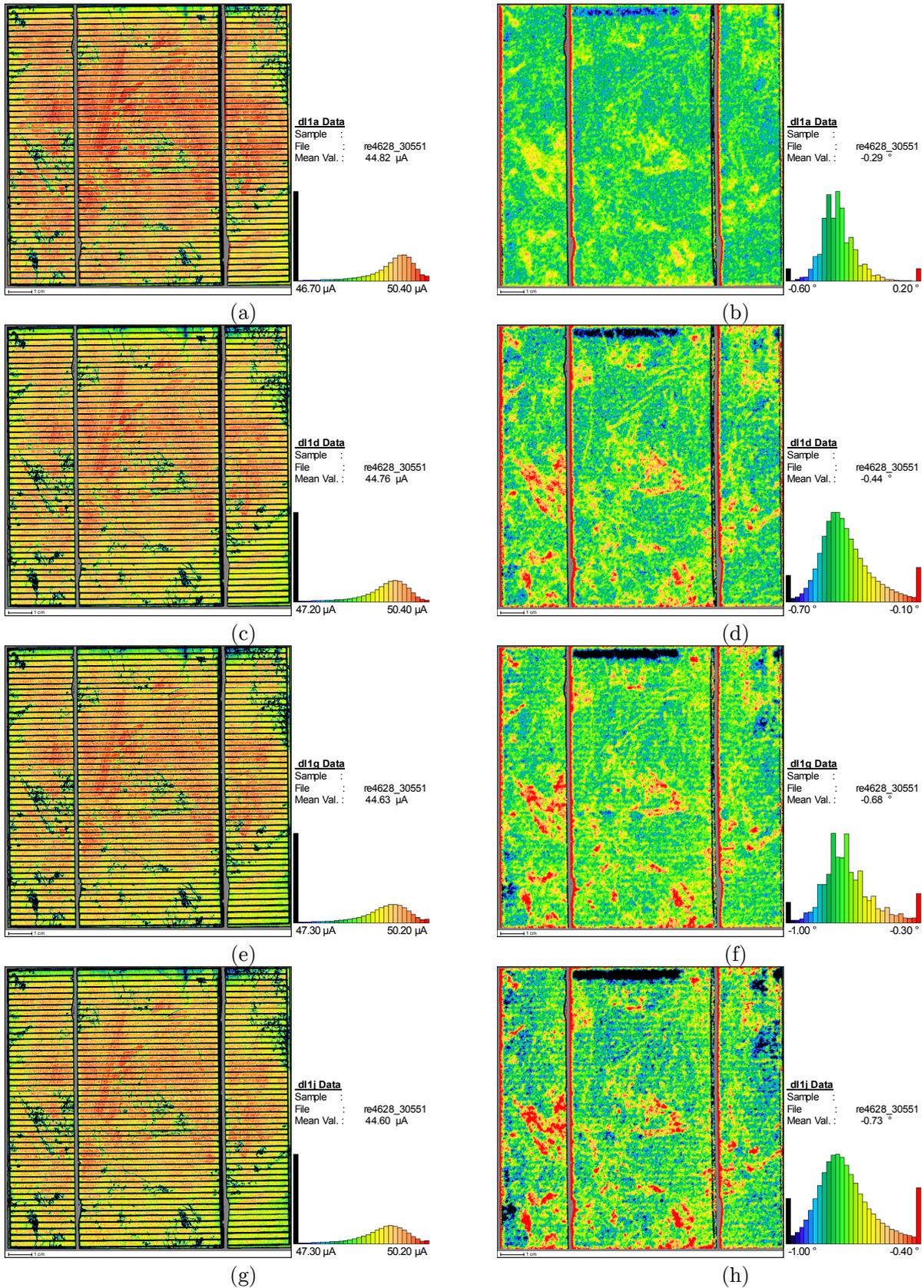


Abb. A.7: Für den Fit vorbereiteter Beispieldatensatz einer mc-Si-Solarzelle (Zelle 107 nach Tabelle B.2). Bilder der Amplitude (links) und der Phasenverschiebung (rechts) gemessen mit dem *RED*-Laser. a) und b) mit 6578 Hz, c) und d) mit 10167 Hz, e) und f) mit 18540 Hz und g) und h) mit 22129 Hz.

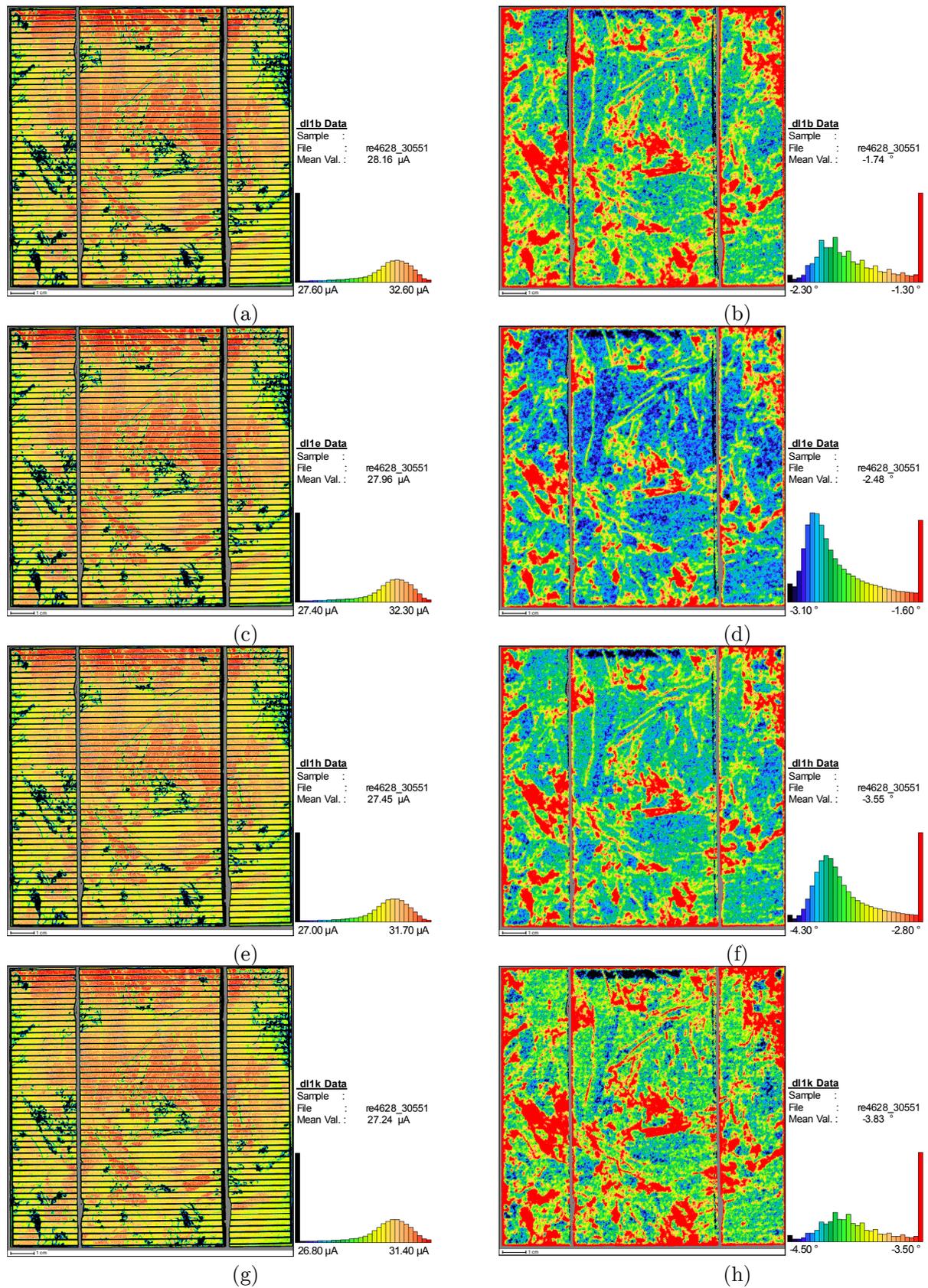


Abb. A.8: Für den Fit vorbereiteter Beispieldatensatz einer mc-Si-Solarzelle (Zelle 107 nach Tabelle B.2). Bilder der Amplitude (links) und der Phasenverschiebung (rechts) gemessen mit dem *IR*-Laser. a) und b) mit 6578 Hz, c) und d) mit 10167 Hz, e) und f) mit 18540 Hz und g) und h) mit 22129 Hz.

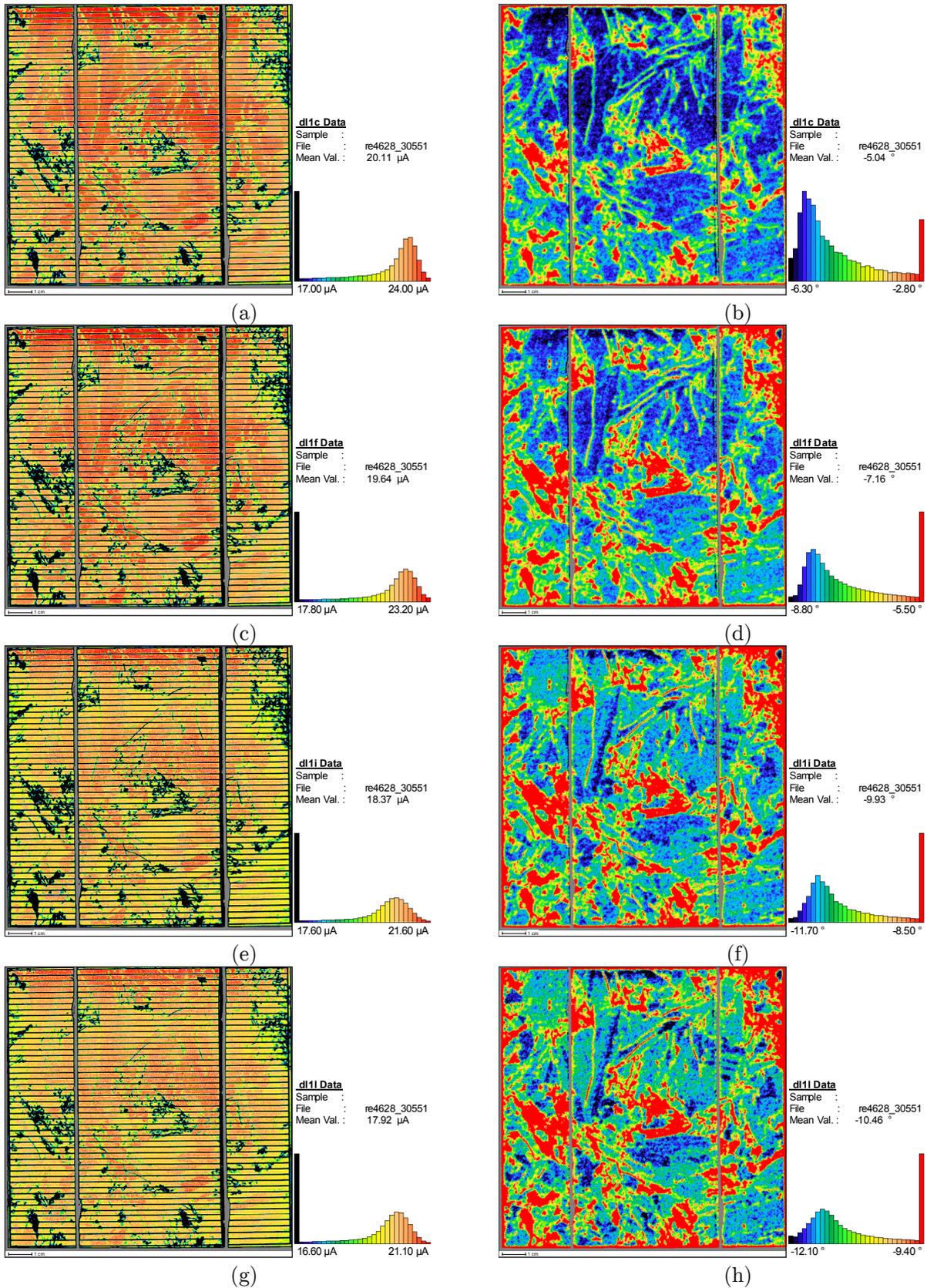


Abb. A.9: Für den Fit vorbereiteter Beispieldatensatz einer mc-Si-Solarzelle (Zelle 107 nach Tabelle B.2). Bilder der Amplitude (links) und der Phasenverschiebung (rechts) gemessen mit dem *SIR* Laser. a) und b) mit 6578 Hz, c) und d) mit 10167 Hz, e) und f) mit 18540 Hz und g) und h) mit 22129 Hz.

Anhang B

Co-Feueroptimierung

B.1 Einfache Voruntersuchungen

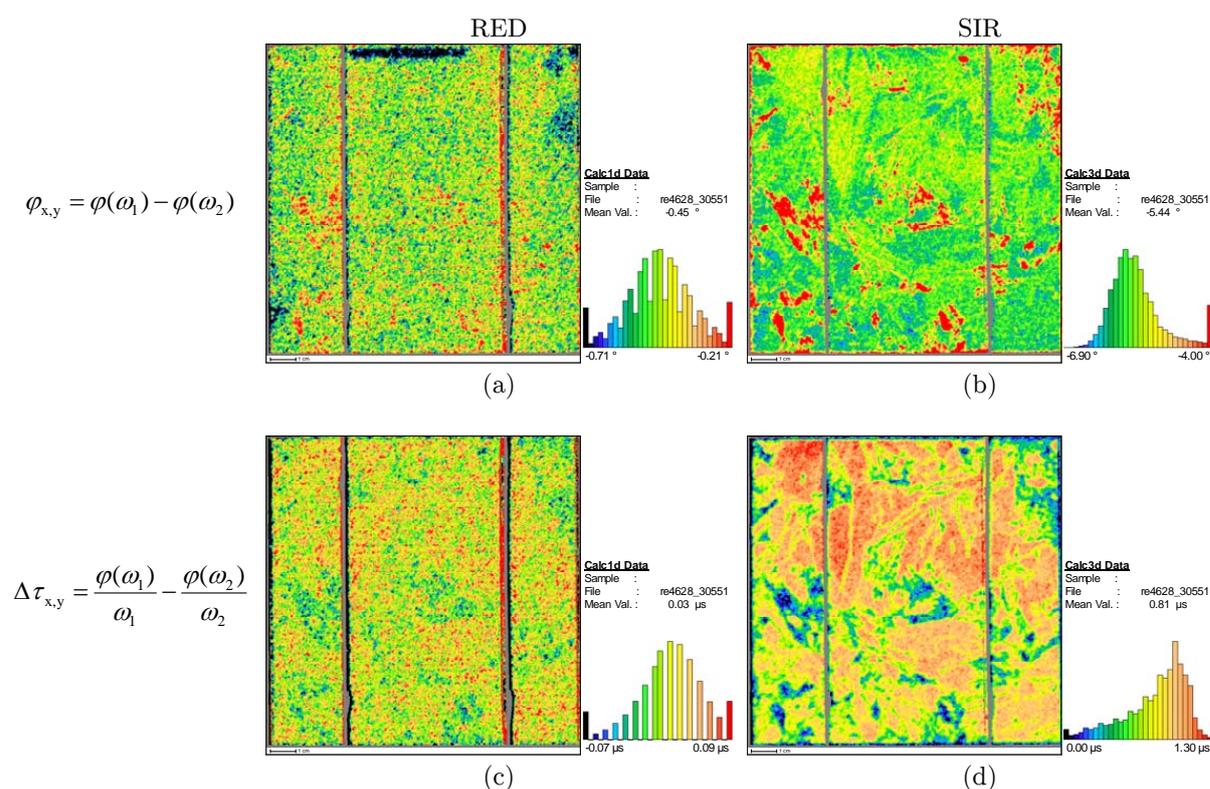


Abb. B.1: Voruntersuchung durch Analyse der Bilder der Phasenverschiebung vom RED- und SIR-Laser zweier verschiedener Perturbationsfrequenzen ($\omega_1 \gg \omega_2$) am Beispiel der Zelle Nr. 107. a) und b) berechnet nach Gl. (2.17), c) und d) berechnet nach Gl. (2.19). a) oben: ein durchbrochener Gridfinger führt zu erhöhtem R_{SERC} , welcher in c) durch die Frequenzkorrektur wie erwartet herausgerechnet wurde und somit nicht mehr sichtbar ist.

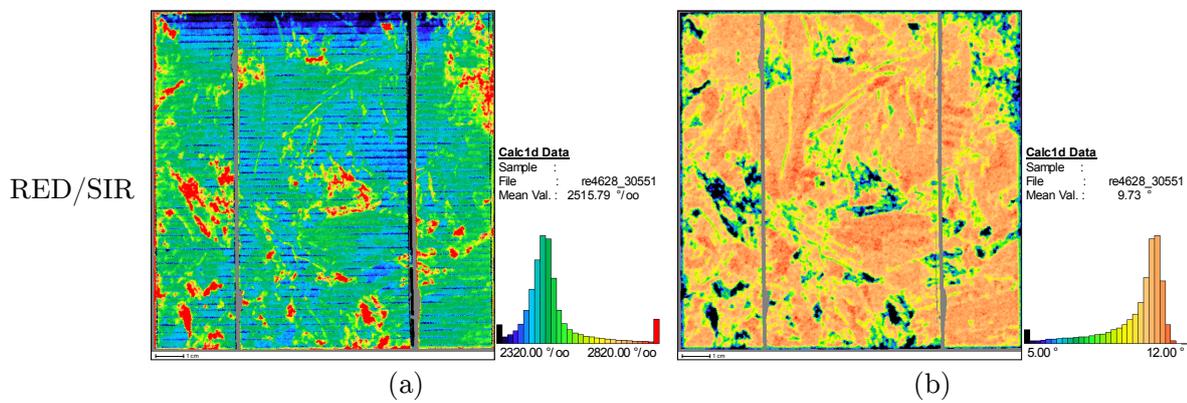


Abb. B.2: Berechnungen aus $dI(\omega = 22129, 20 \text{ Hz})$ von RED- und SIR-Laser: a) Das Amplitudenverhältnisbild ($A_{x,y}(\text{RED})/A_{x,y}(\text{SIR})$) zeigt, wie am oberen Bildrand zu sehen, Unterschiede in der Reflexion beider Laser auf; b) Differenzbild der Phasenverschiebung ($\varphi_{x,y}(\text{RED}) - \varphi_{x,y}(\text{SIR})$) zeigt Inhomogenitäten in S_b oder τ auf.

B.2 Fitergebnisse

Name	lokale Fitparameter
„SRC3x3“	S_b , RC -Glieder und Amplitude für RED-, IR- und SIR-Laser
„tSRC1“	τ , S_b , RC -Glieder und Amplitude für RED-Laser

Tabelle B.1: Lokale Fitparameter der hier verwendeten Fitmodelle, hergeleitet aus Gl. (2.9) und Gl. (2.10).

Zellnr.	T_p in °C	d_W in μm	Fitergebnisse
101	840	301,5	Abb. B.3, Abb. B.10
169	840	331,8	Abb. B.4, Abb. B.11
102	855	335,8	Abb. B.5, Abb. B.12
171	870	328,8	Abb. B.6, Abb. B.13
104	885	333,5	Abb. B.7, Abb. B.14
107	900	331,8	Abb. B.8, Abb. B.15
111	915	326,8	Abb. B.9, Abb. B.16

Tabelle B.2: Probenübersicht der im folgenden vorgestellten Fitergebnisse der Photoimpedanzanalyse. Alle Zellen wurden mit einer Bandgeschwindigkeit von 1800 mm/min hergestellt. Die Waferdicke d_W wurde nach Abschnitt 3.3.2 mit dem USB-gesteuerten Mikroskop bestimmt.

B.3 Fitmodell „SRC3x3“

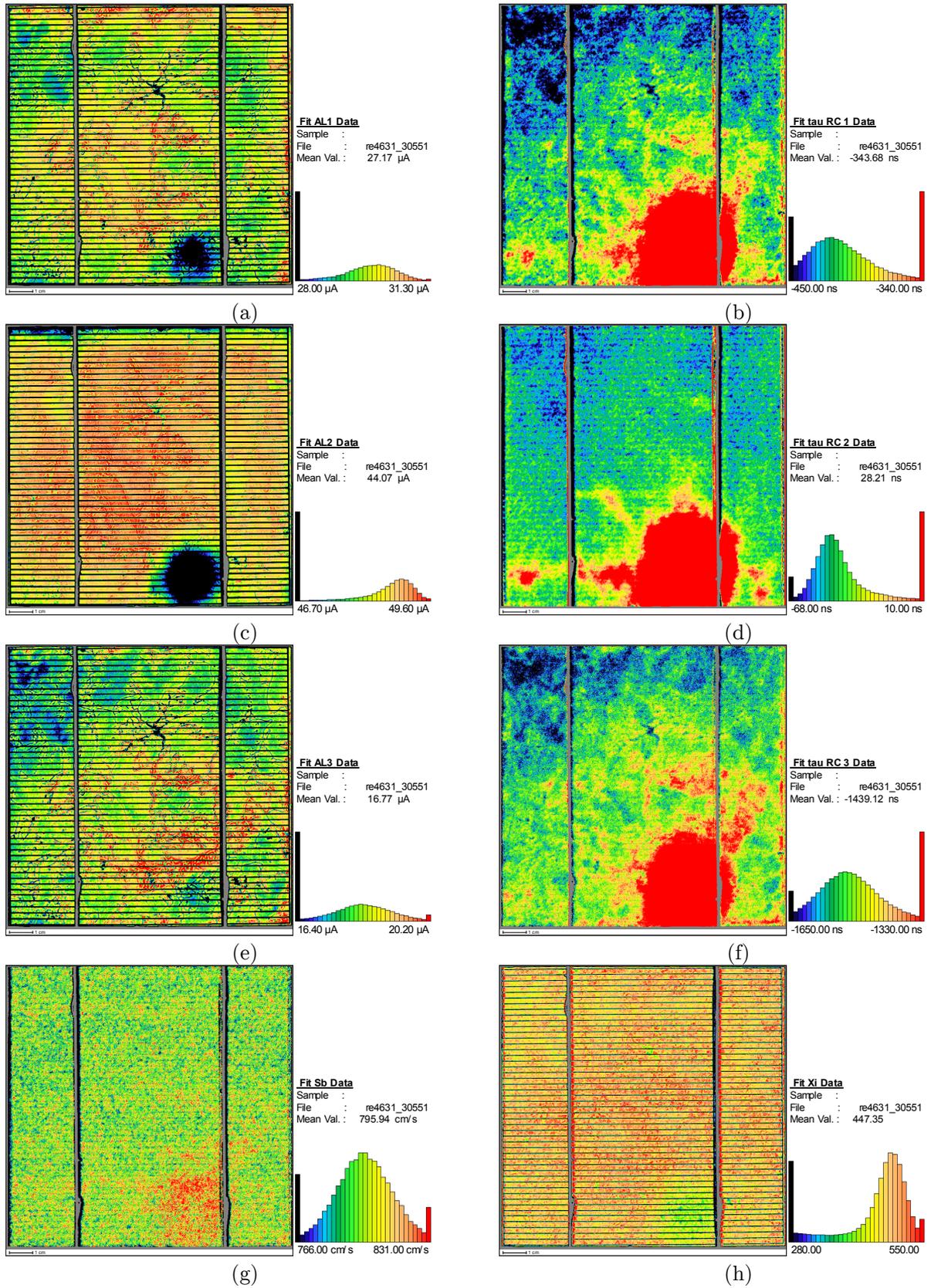


Abb. B.3: Fitergebnisse von Zelle Nr. 101 für die Modellfunktion „SRC3x3“. a) Amplitude des IR-Lasers, b) RC-Glied des IR-Lasers, c) Amplitude des RED-Lasers, d) RC-Glied des RED-Lasers, e) Amplitude des SIR-Lasers, f) RC-Glied des SIR-Lasers, g) S_b und h) χ^2 .

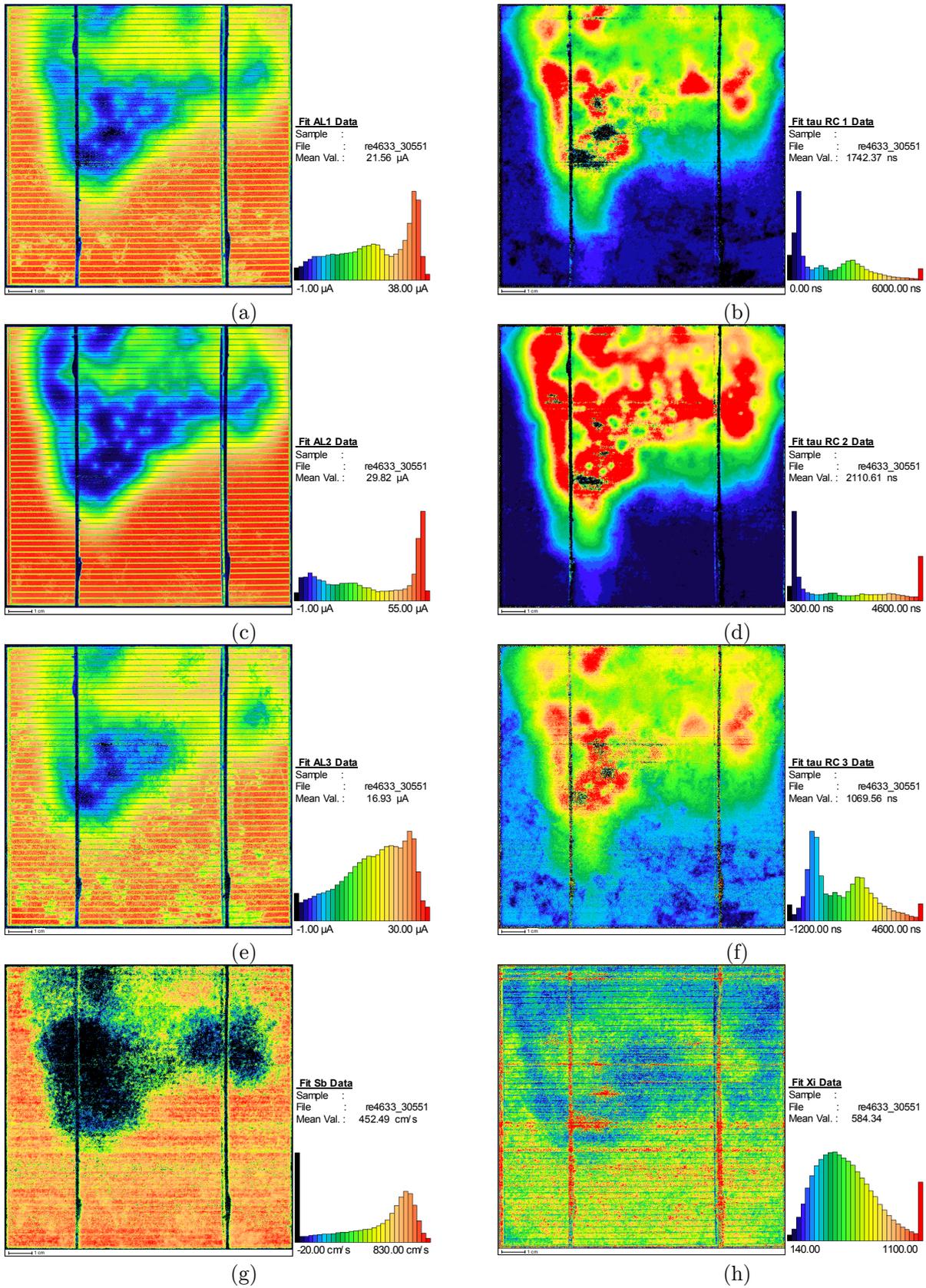


Abb. B.4: Fitergebnisse von Zelle Nr. 169 für die Modellfunktion „SRC3x3“. a) Amplitude des IR-Lasers, b) RC-Glied des IR-Lasers, c) Amplitude des RED-Lasers, d) RC-Glied des RED-Lasers, e) Amplitude des SIR-Lasers, f) RC-Glied des SIR-Lasers, g) S_b und h) χ^2 .

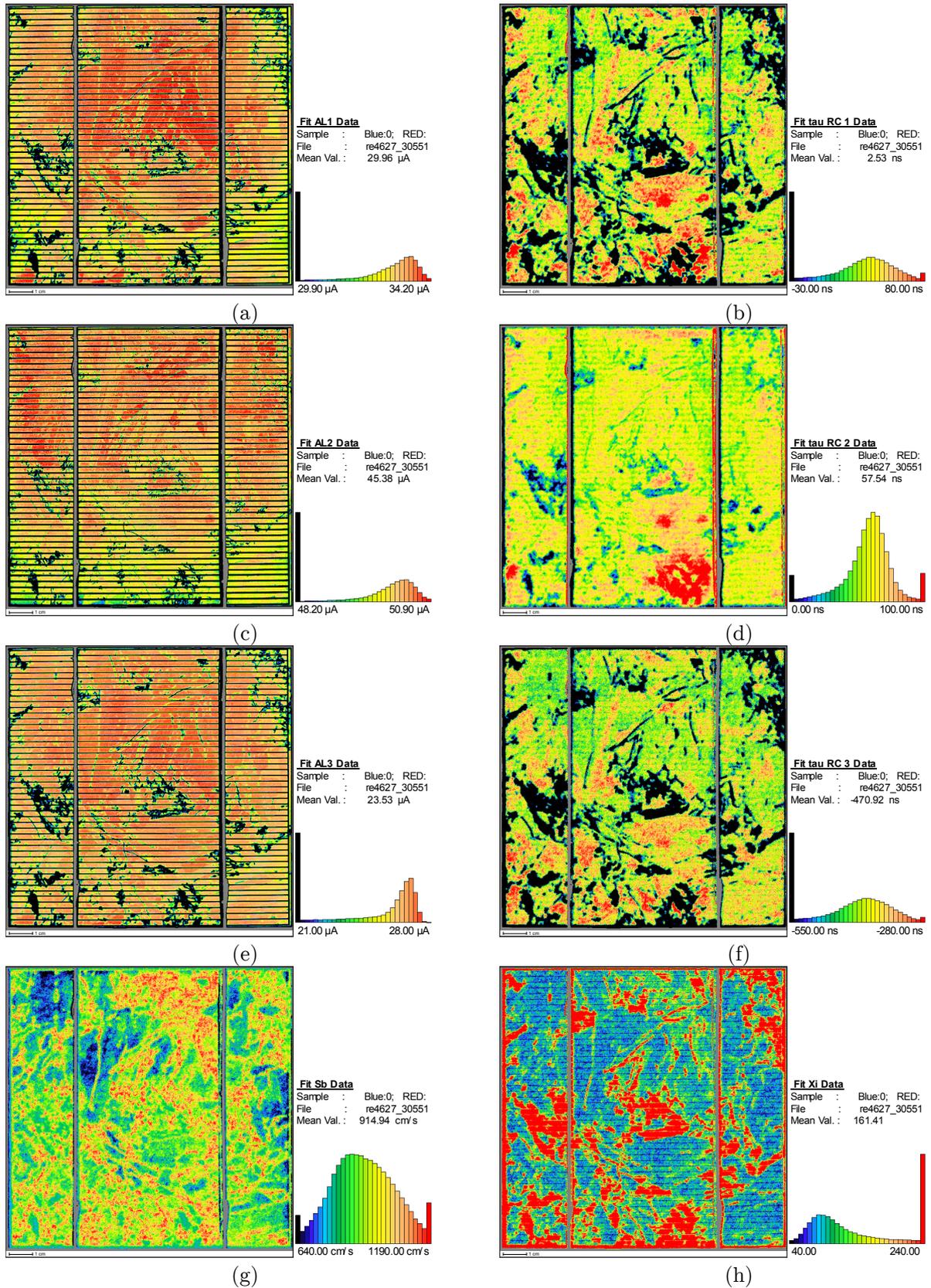


Abb. B.5: Fitergebnisse von Zelle Nr. 102 für die Modellfunktion „SRC3x3“. a) Amplitude des IR-Lasers, b) RC-Glied des IR-Lasers, c) Amplitude des RED-Lasers, d) RC-Glied des RED-Lasers, e) Amplitude des SIR-Lasers, f) RC-Glied des SIR-Lasers, g) S_b und h) χ^2 .

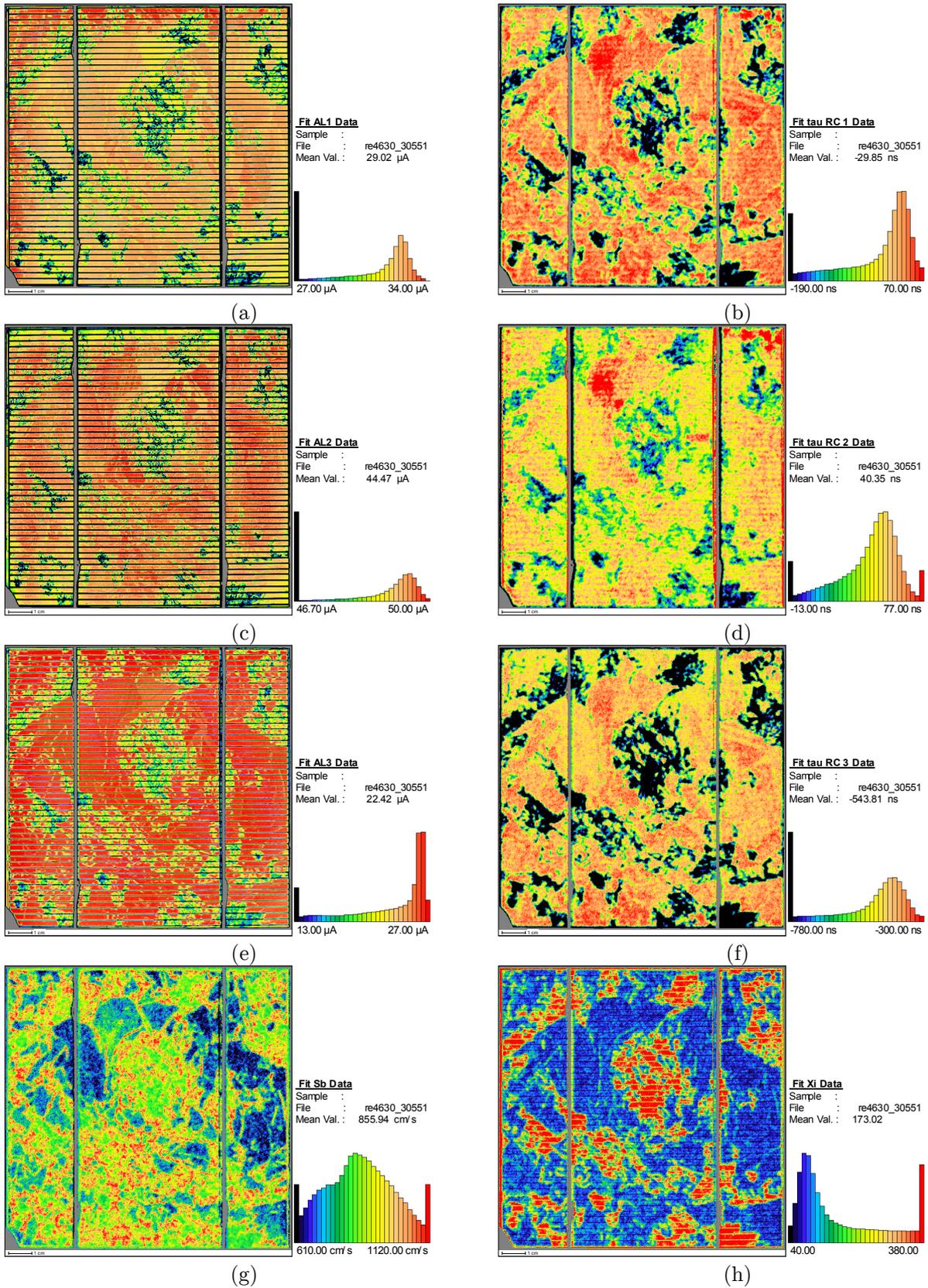


Abb. B.6: Fitergebnisse von Zelle Nr. 171 für die Modellfunktion „SRC3x3“. a) Amplitude des IR-Lasers, b) RC-Glied des IR-Lasers, c) Amplitude des RED-Lasers, d) RC-Glied des RED-Lasers, e) Amplitude des SIR-Lasers, f) RC-Glied des SIR-Lasers, g) S_b und h) χ^2 .

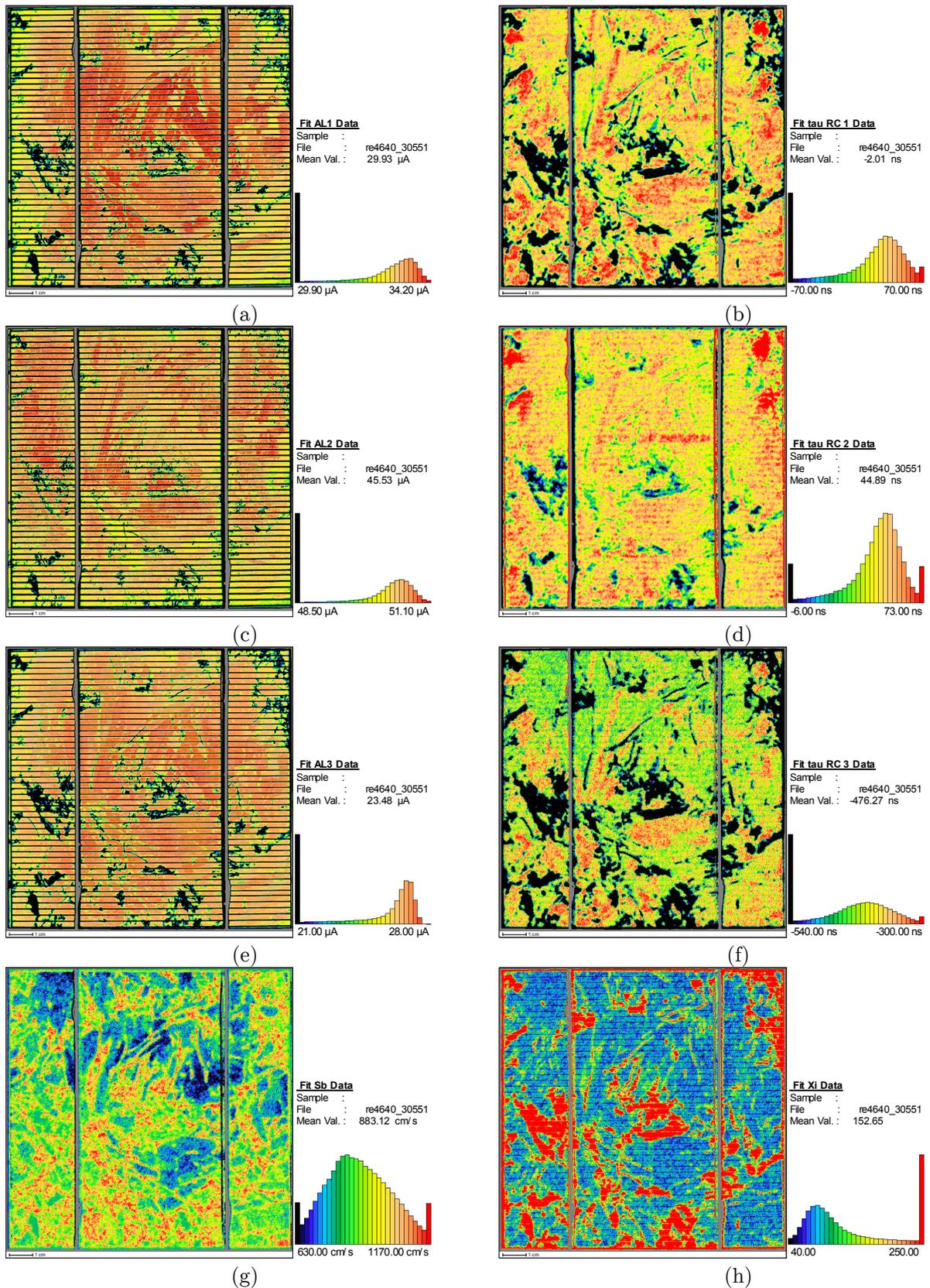


Abb. B.7: Fitergebnisse von Zelle Nr. 104 für die Modellfunktion „SRC3x3“. a) Amplitude des IR-Lasers, b) RC -Glied des IR-Lasers, c) Amplitude des RED-Lasers, d) RC -Glied des RED-Lasers, e) Amplitude des SIR-Lasers, f) RC -Glied des SIR-Lasers, g) S_b und h) χ^2 .

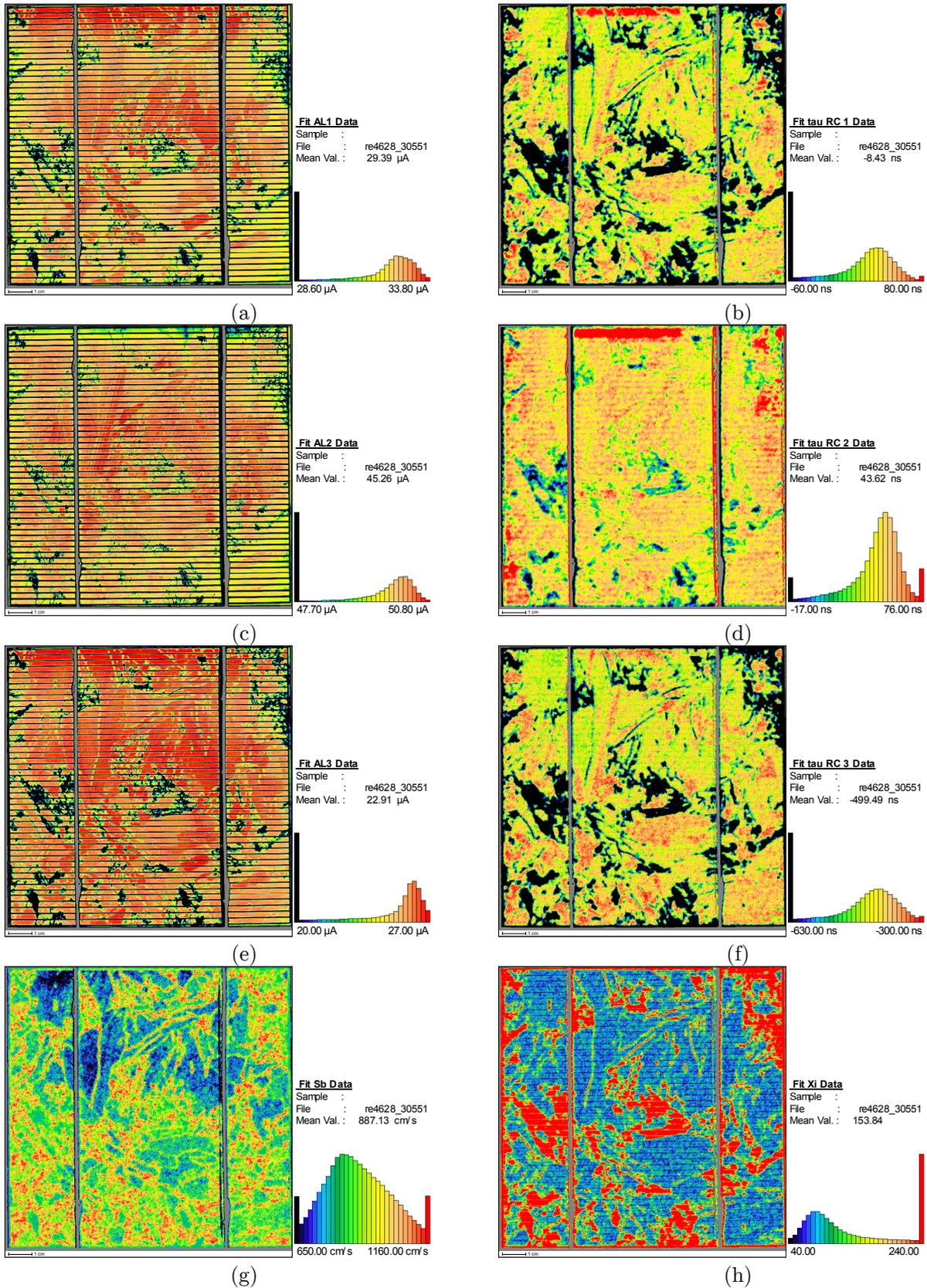


Abb. B.8: Fitergebnisse von Zelle Nr. 107 für die Modellfunktion „SRC3x3“. a) Amplitude des IR-Lasers, b) RC -Glied des IR-Lasers, c) Amplitude des RED-Lasers, d) RC -Glied des RED-Lasers, e) Amplitude des SIR-Lasers, f) RC -Glied des SIR-Lasers, g) S_b und h) χ^2 .

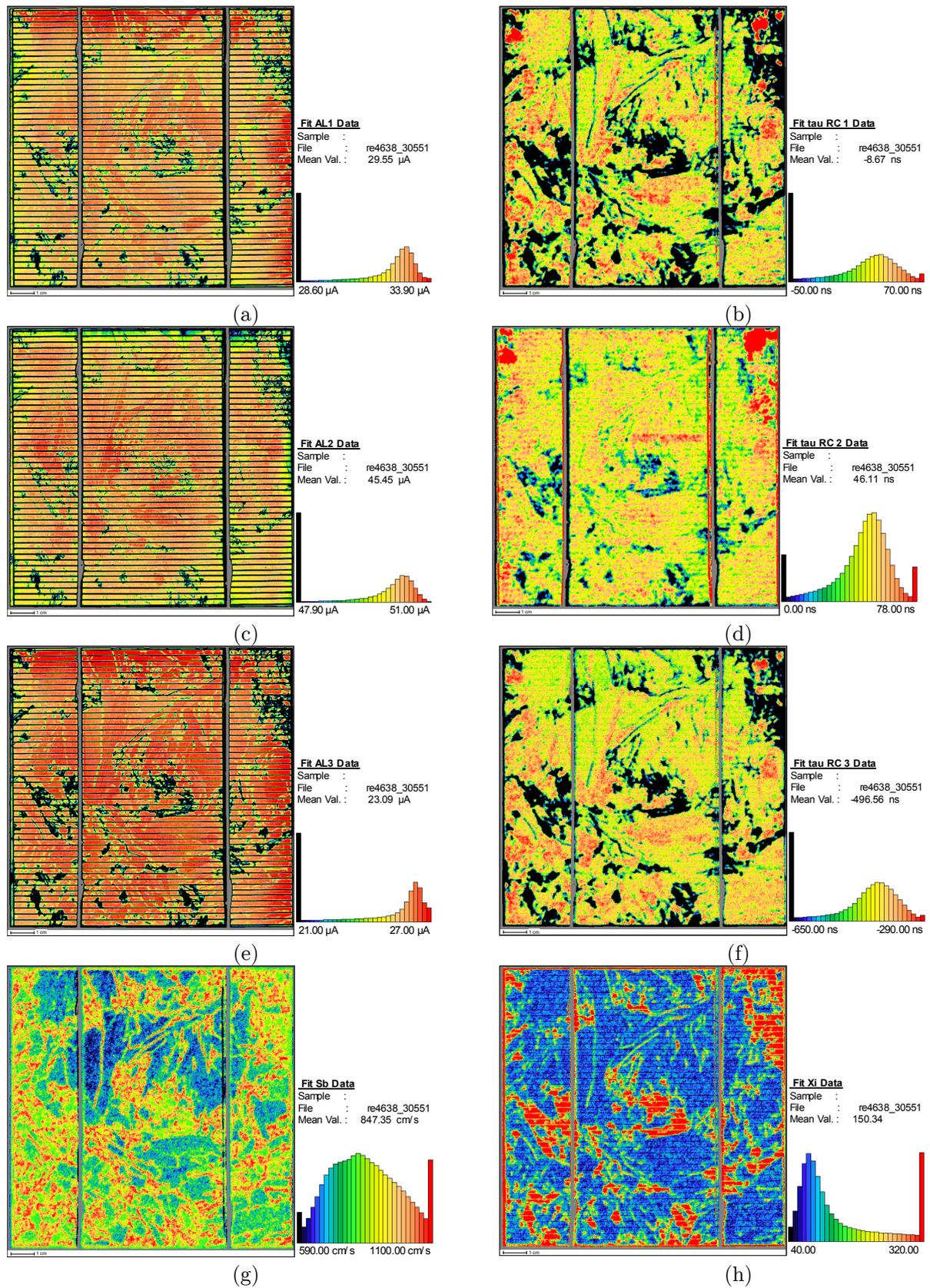


Abb. B.9: Fittergebnisse von Zelle Nr. 111 für die Modellfunktion „SRC3x3“. a) Amplitude des IR-Lasers, b) RC-Glied des IR-Lasers, c) Amplitude des RED-Lasers, d) RC-Glied des RED-Lasers, e) Amplitude des SIR-Lasers, f) RC-Glied des SIR-Lasers, g) S_b und h) χ^2 .

B.4 Fitmodell „tSRC1“

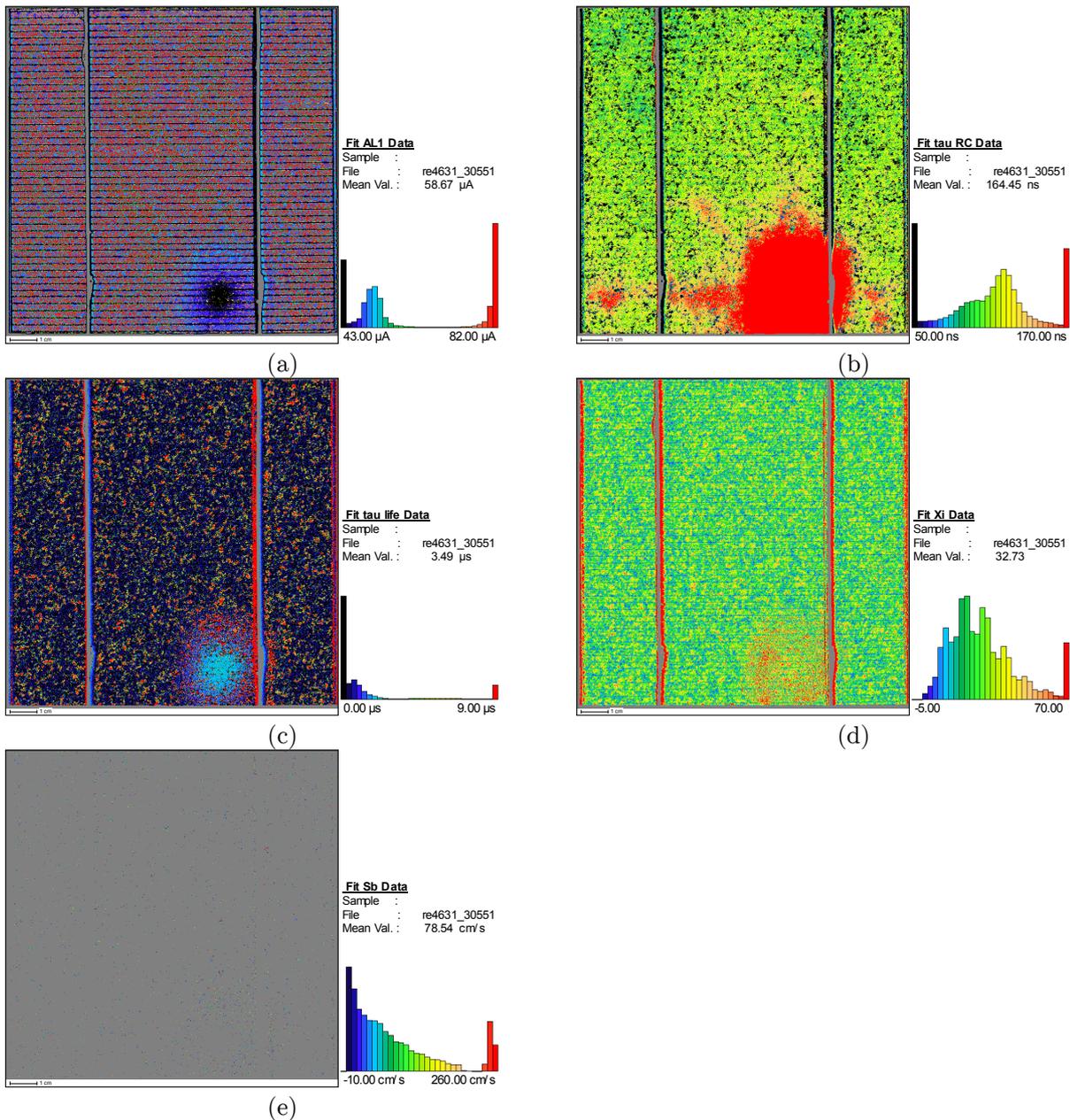


Abb. B.10: Fitergebnisse von Zelle Nr. 101 für die Modellfunktion „tSRC1“. a) Amplitude des RED-Lasers, b) RC -Glied des RED-Lasers, c) τ_{life} , d) χ^2 und e) S_b .

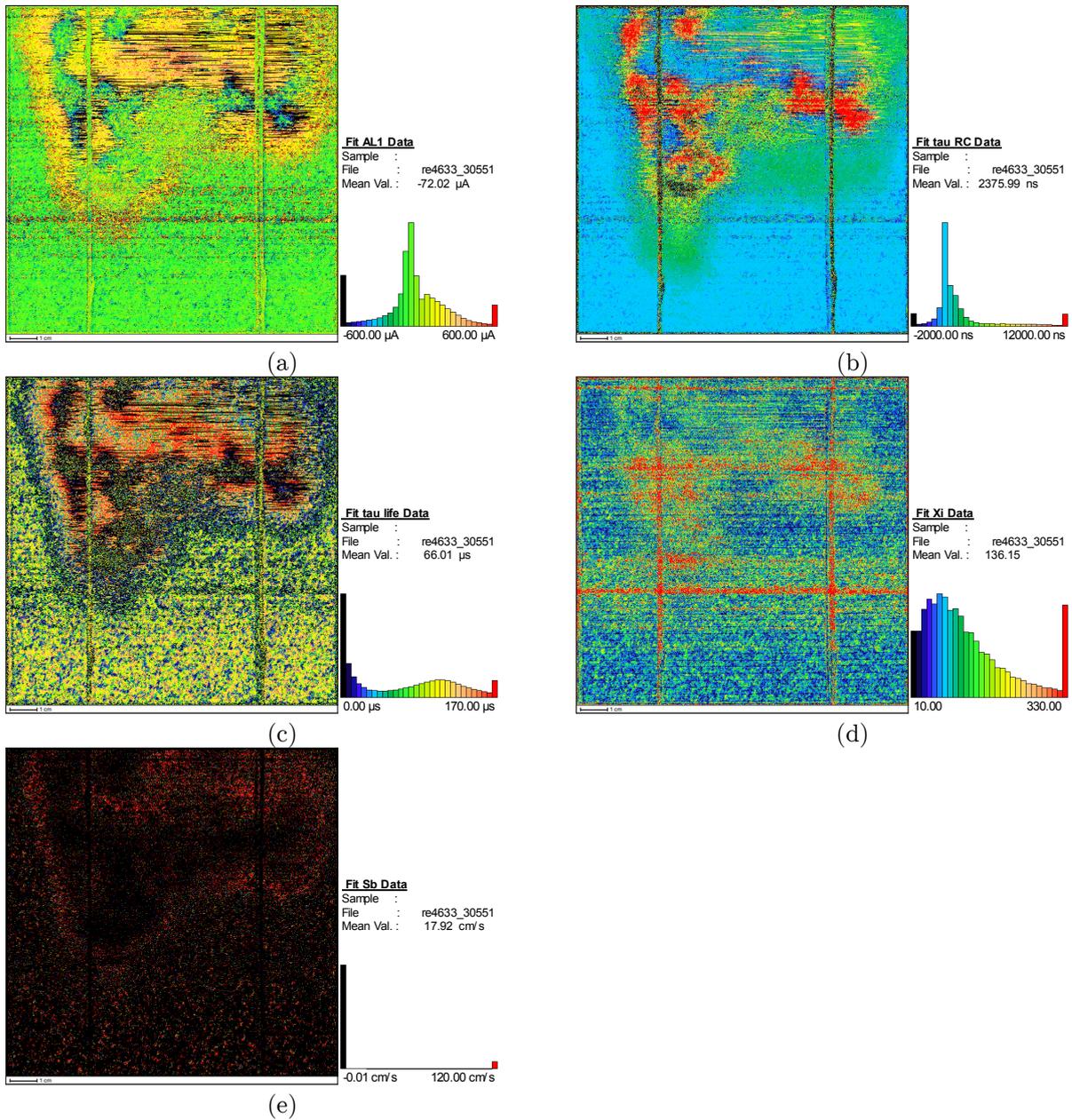


Abb. B.11: Fitergebnisse von Zelle Nr. 169 für die Modellfunktion „tSRC1“. a) Amplitude des RED-Lasers, b) RC-Glied des RED-Lasers, c) τ_{life} , d) χ^2 und e) S_b .

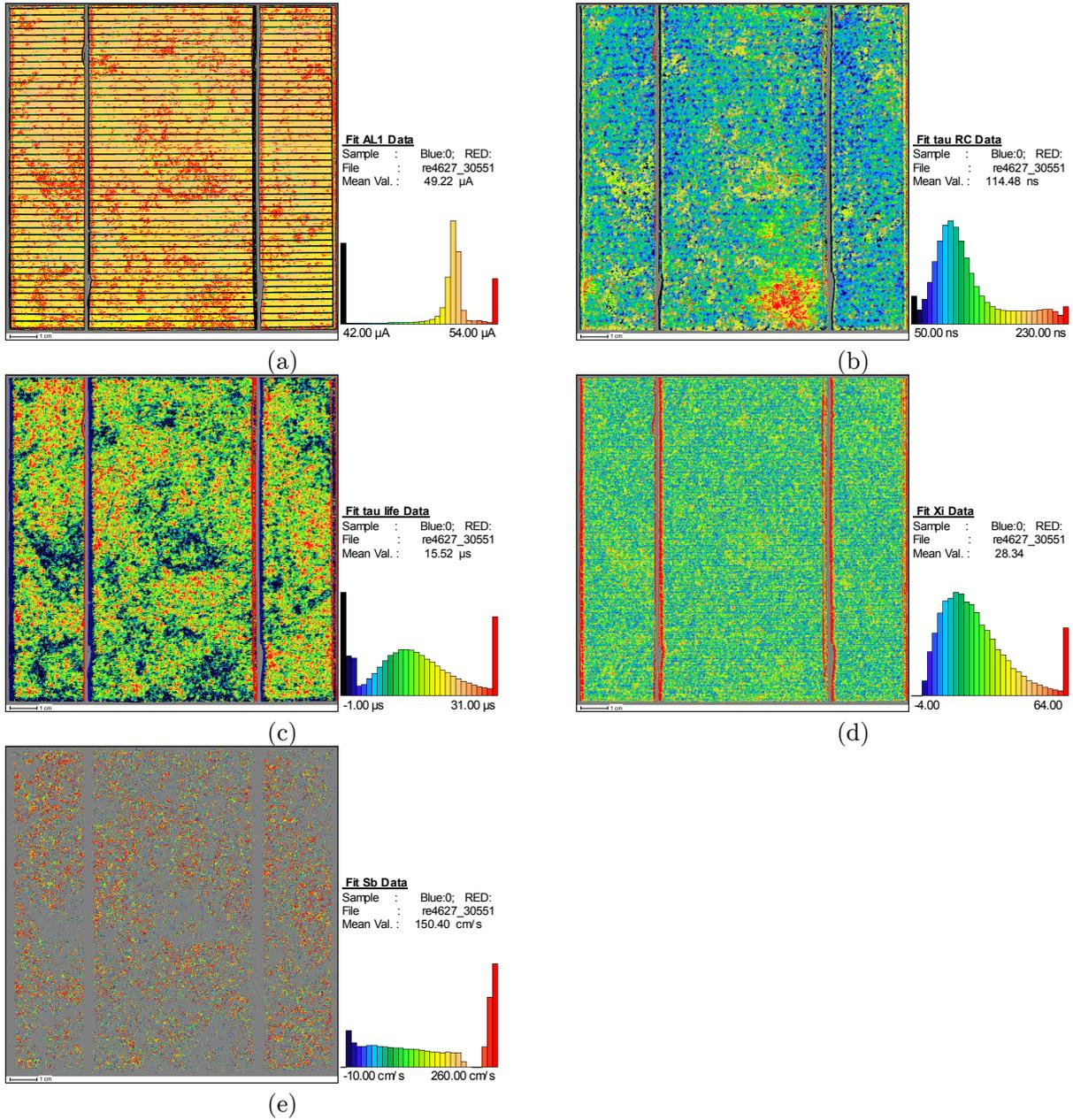


Abb. B.12: Fitergebnisse von Zelle Nr. 102 für die Modellfunktion „tSRC1“. a) Amplitude des RED-Lasers, b) RC -Glied des RED-Lasers, c) τ_{life} , d) χ^2 und e) S_b .

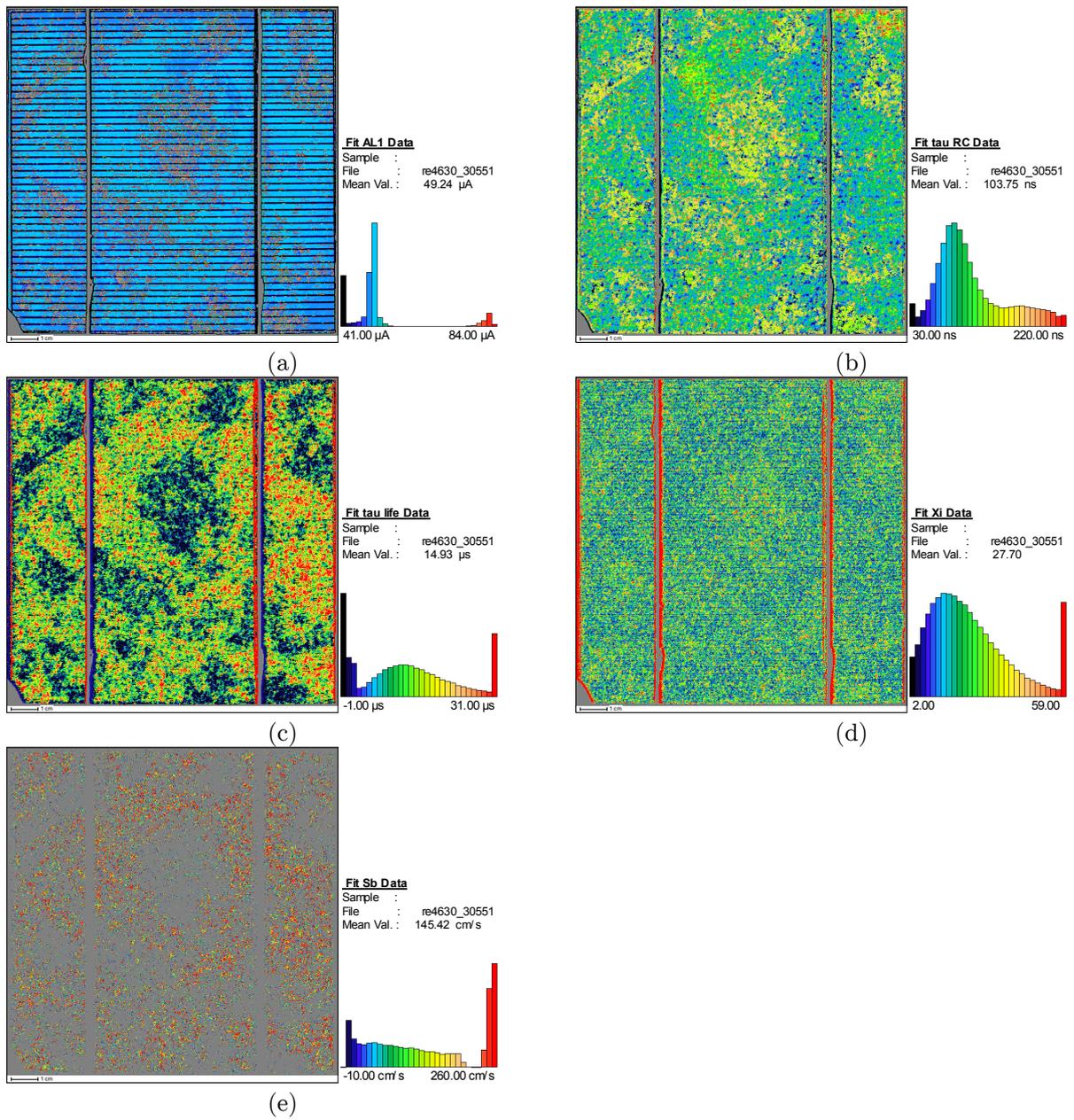


Abb. B.13: Fitergebnisse von Zelle Nr. 171 für die Modellfunktion „tSRC1“. a) Amplitude des RED-Lasers, b) RC -Glied des RED-Lasers, c) τ_{ife} , d) χ^2 und e) S_b .

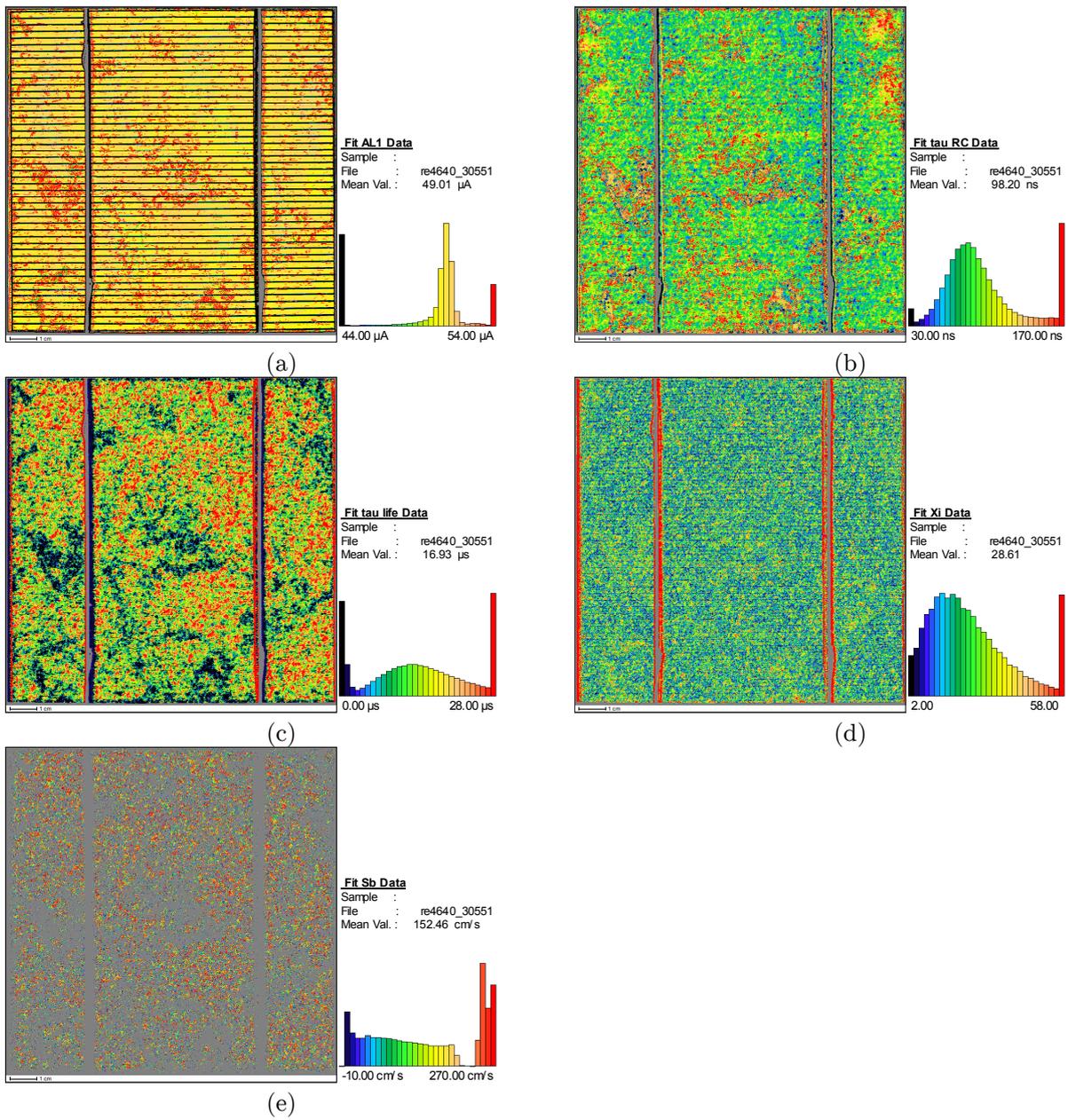


Abb. B.14: Fitergebnisse von Zelle Nr. 104 für die Modellfunktion „tSRC1“. a) Amplitude des RED-Lasers, b) RC-Glied des RED-Lasers, c) τ_{life} , d) χ^2 und e) S_b .

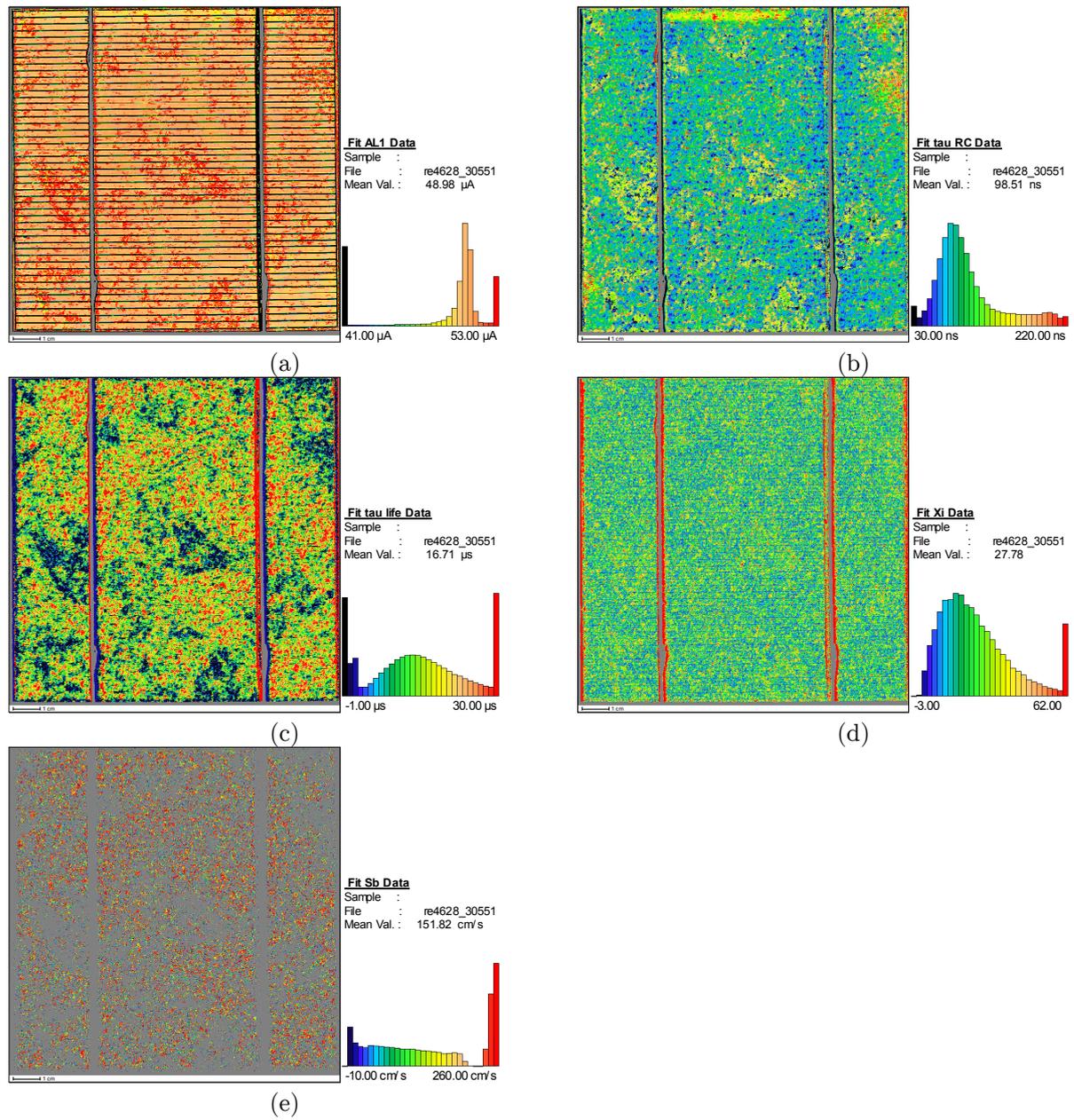


Abb. B.15: Fitergebnisse von Zelle Nr. 107 für die Modellfunktion „tSRC1“. a) Amplitude des RED-Lasers, b) RC -Glied des RED-Lasers, c) τ_{life} , d) χ^2 und e) S_b .

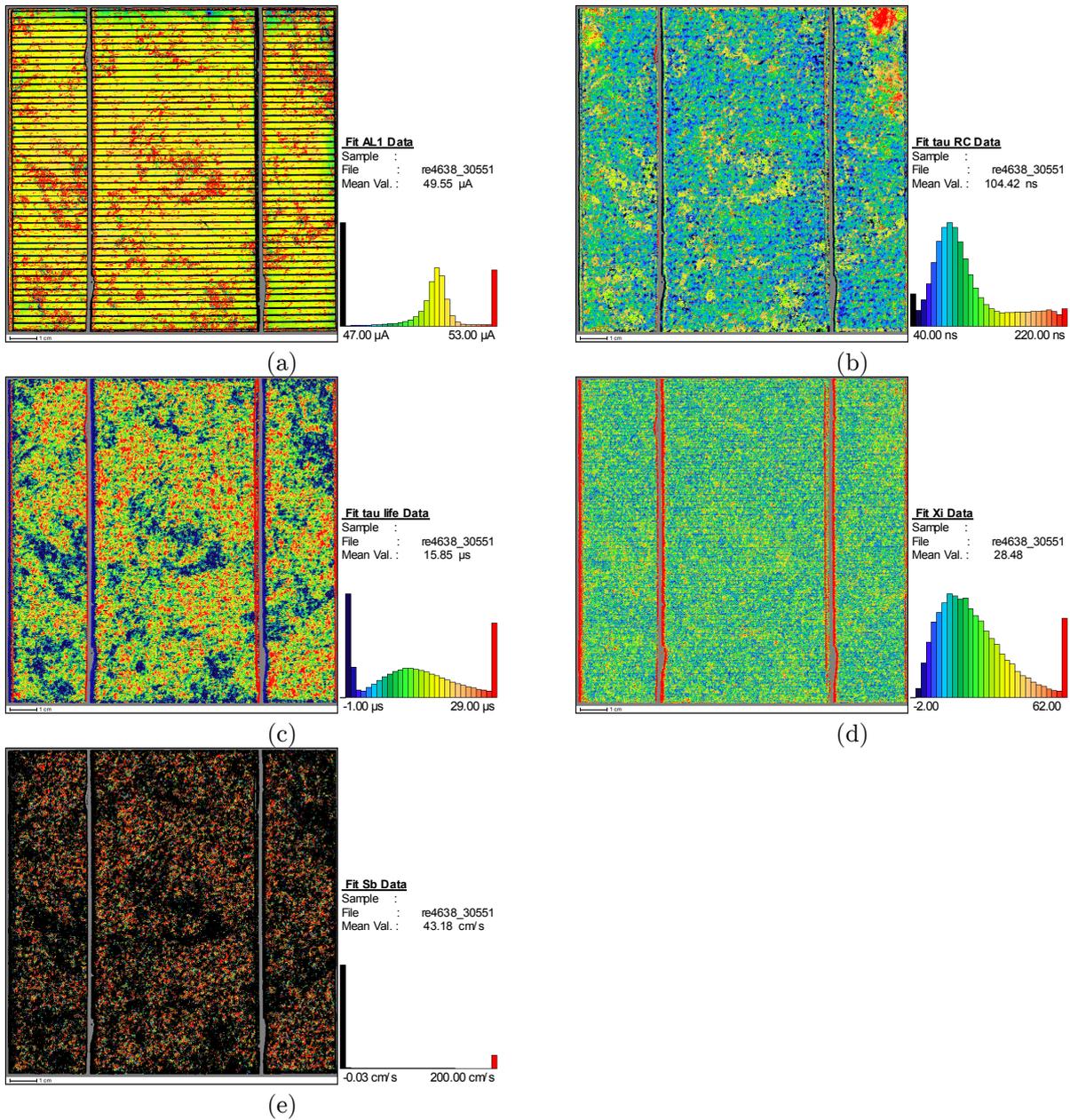


Abb. B.16: Fitergebnisse von Zelle Nr. 111 für die Modellfunktion „tSRC1“. a) Amplitude des RED-Lasers, b) RC -Glied des RED-Lasers, c) τ_{life} , d) χ^2 und e) S_b .

Anhang C

Untersuchungen von Nichtlinearitäten, induziert durch Lüftervibrationen

C.1 Komplettdatensatz der Tandemsolarzelle

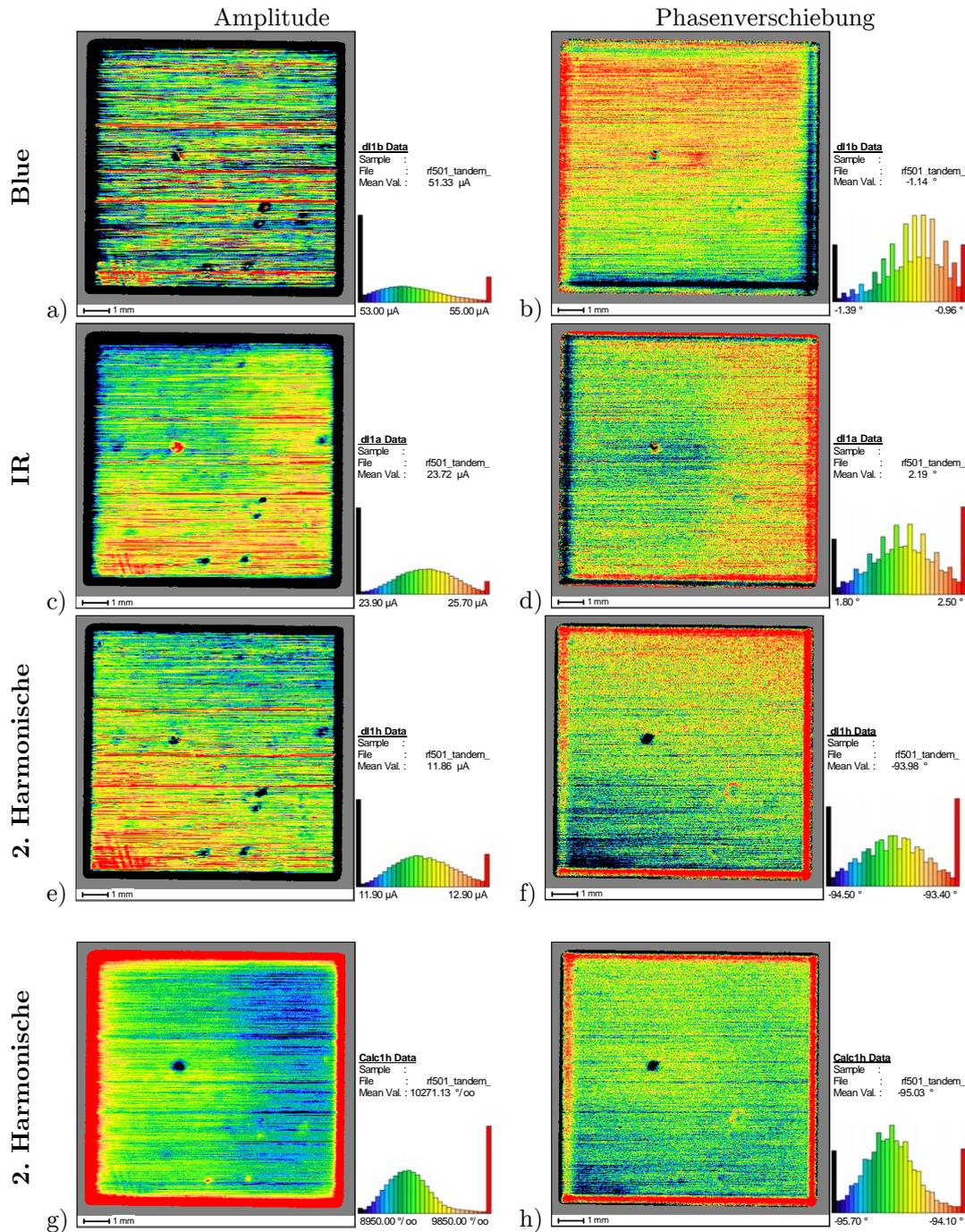


Abb. C.1: Nichtlinearitäten (horizontale Streifen) induziert durch mechanische Vibrationen eines Lüfters: Simultan gemessene Kurzschlussstrombilder unter Verwendung zweier konfokaler Laserstrahlen. Blauer Laser bei Frequenz $f_a = 10$ kHz, IR Laser bei Frequenz $f_b = 6$ kHz; a) Amplitude $A_{x,y}(\omega_a)$ und b) Phasenverschiebung $\varphi_{x,y}(\omega_a)$ des blauen Lasers; c) Amplitude $A_{x,y}(\omega_b)$ und d) Phasenverschiebung $\varphi_{x,y}(\omega_b)$ des IR-Lasers; e) Amplitude $A_{x,y}(\omega_a + \omega_b)$ und f) Phasenverschiebung $\varphi_{x,y}(\omega_a + \omega_b)$ von der gemischten zweiten Harmonischen zwischen dem blauen und dem IR-Laserphotostrom; g) Amplitudenverhältnisbild nach Gl. (2.26), h) Phasenverschiebungsverhältnisbild nach Gl. (2.26). Weil die Nichtlinearitäten durch horizontale Streifen schon in den Amplitudendaten in a) und c) zu erkennen sind, werden im folgenden Vergleich lediglich Amplituden-Daten verwendet.

C.2 Nichtlinearer Einfluss von Lüftervibrationen auf „Current matching“

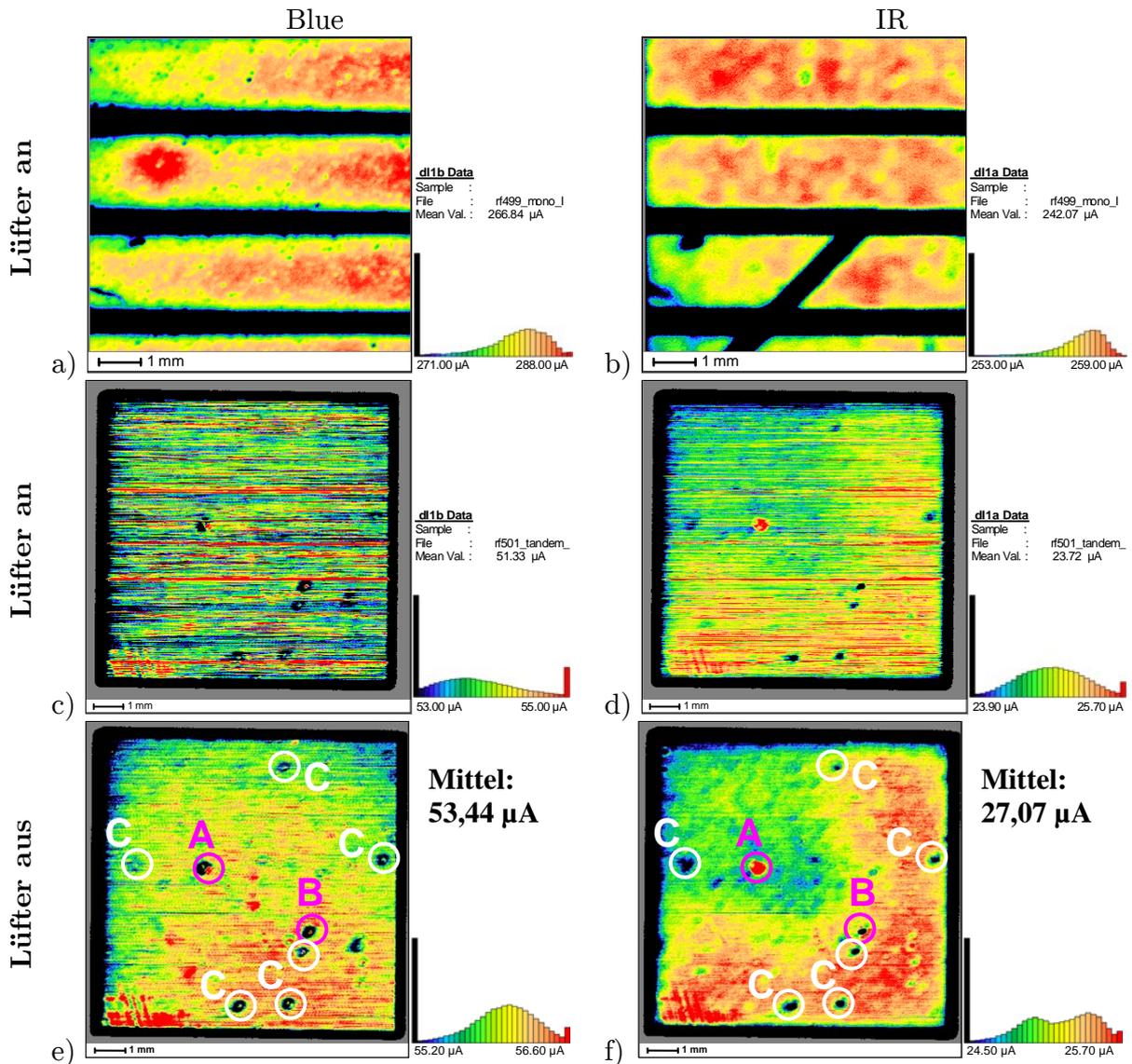
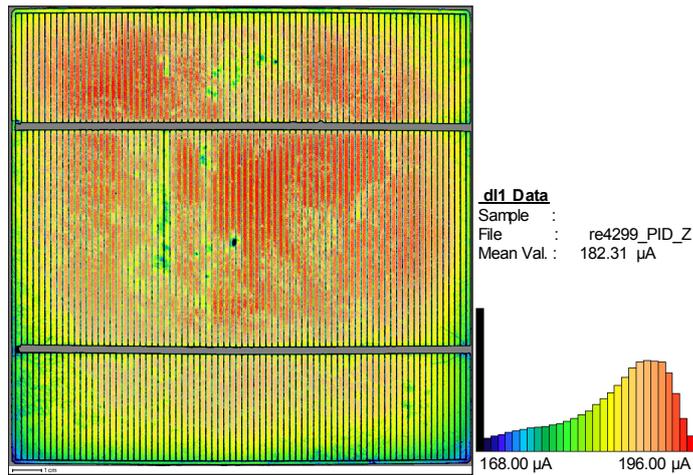


Abb. C.2: Kurzschlussstrombilder mit gleicher Ortsauflösung für simultane Messungen mit dem Blue- und dem IR-Laser: a) und b) normale Messung einer multikristallinen Si-Solarzelle. c) und d) Messung an der Tandemsolarzelle mit eingeschaltetem Lüfter und e) und f) mit ausgeschaltetem Lüfter. Nur die Verwendung von Tandemsolarzellen mit der Randbedingung von „Current matching“ macht die Nichtlinearitäten (horizontale Linien), verursacht durch die Lüftervibrationen, sichtbar.

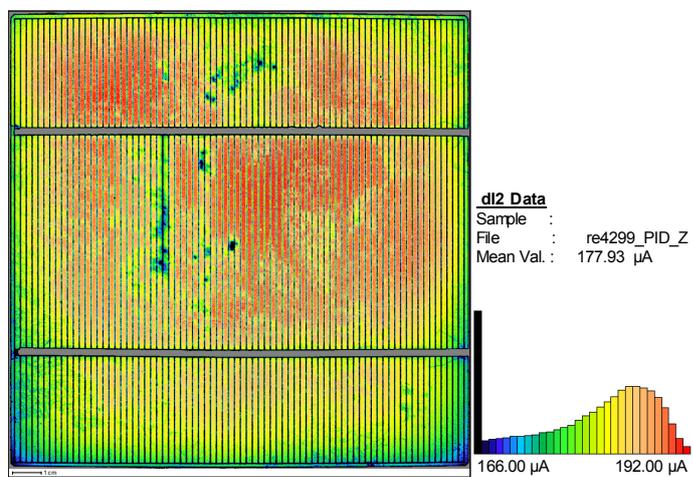
Anhang D

Untersuchungen zu PID und Regeneration

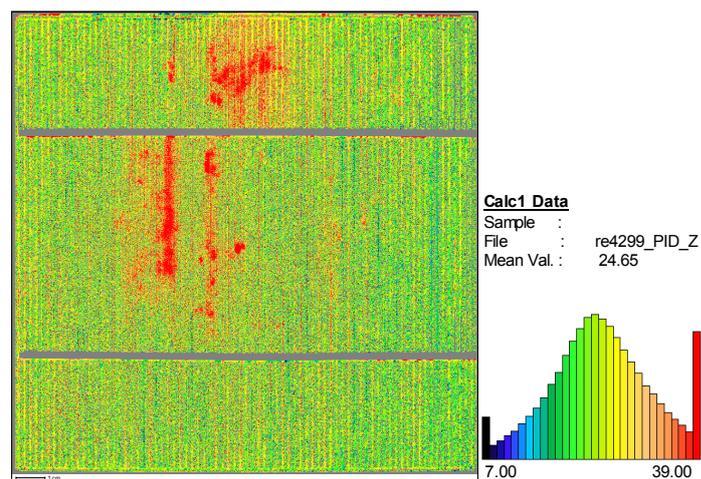
D.1 Beispielhafte Berechnung eines Calc1-Datensatzes



(a)



(b)



(c)

Abb. D.1: Amplitudenbild des Photostroms bei -300 mV in a) und 0 mV in b). c) Das Calc1-Verhältnissbild nach Gl. (3.1) zeigt sehr deutlich stark verschuntete Bereiche in Rot. Diese Shuntbereiche sind auch als Photostromverlust in a) und b) zu sehen, sie sind aber schwer von Verlusten zu unterscheiden, die durch Versetzungsnetze verursacht sind. Das Calc1-Bild in c) ist also sehr gut geeignet, um Shunts aufzuspüren.

D.2 Übersichten von Standardbildern

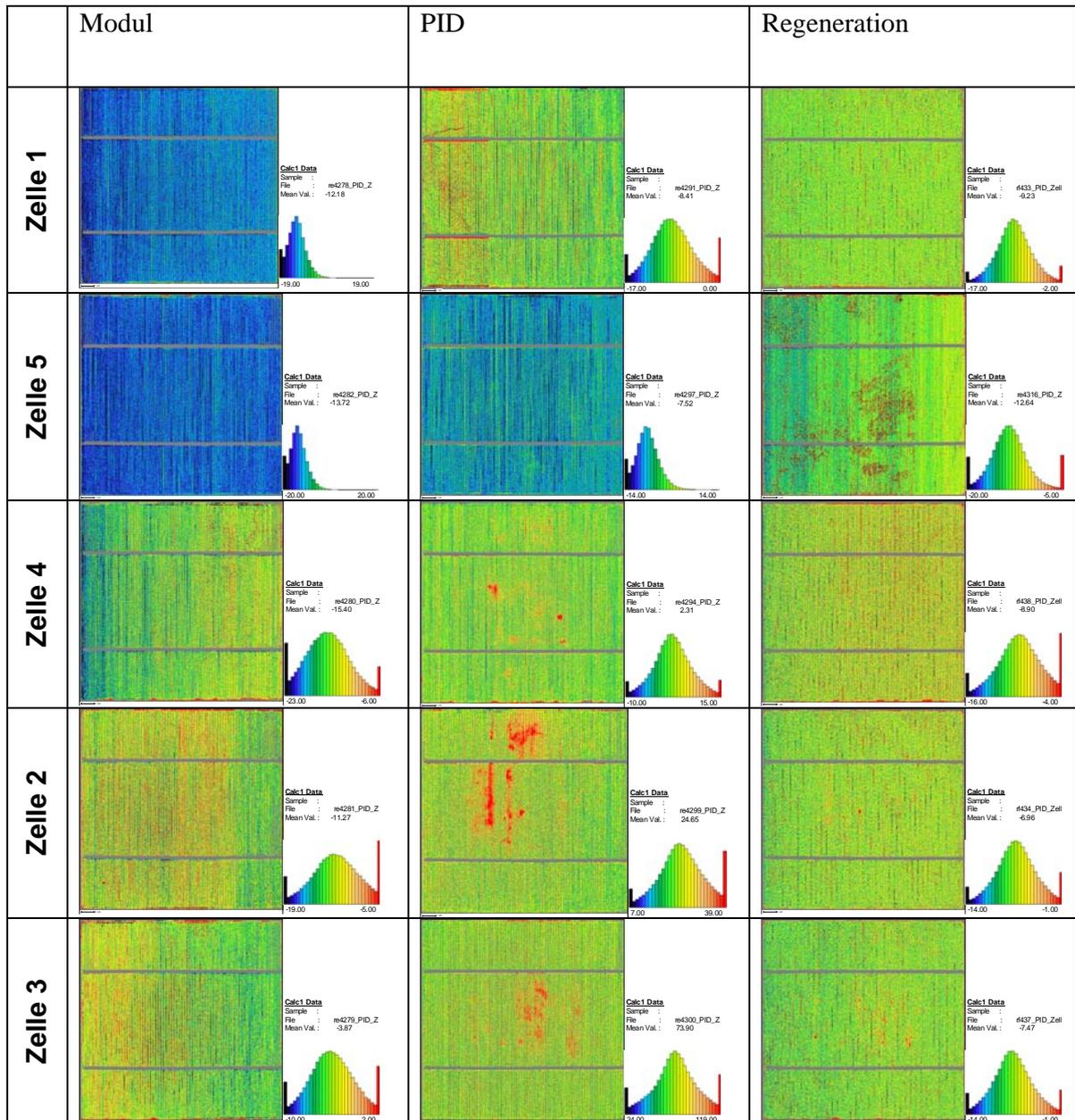


Abb. D.2: Übersichtsmatrix der Calc1-Bilder, berechnet nach Gl. (3.1). Es ist sehr deutlich zu erkennen, wie die Shunts als rote Flächen bei Zelle 3, Zelle 2 und Zelle 4 nach dem PID-Schritt auftauchen und nach der Regeneration wieder verschwinden.

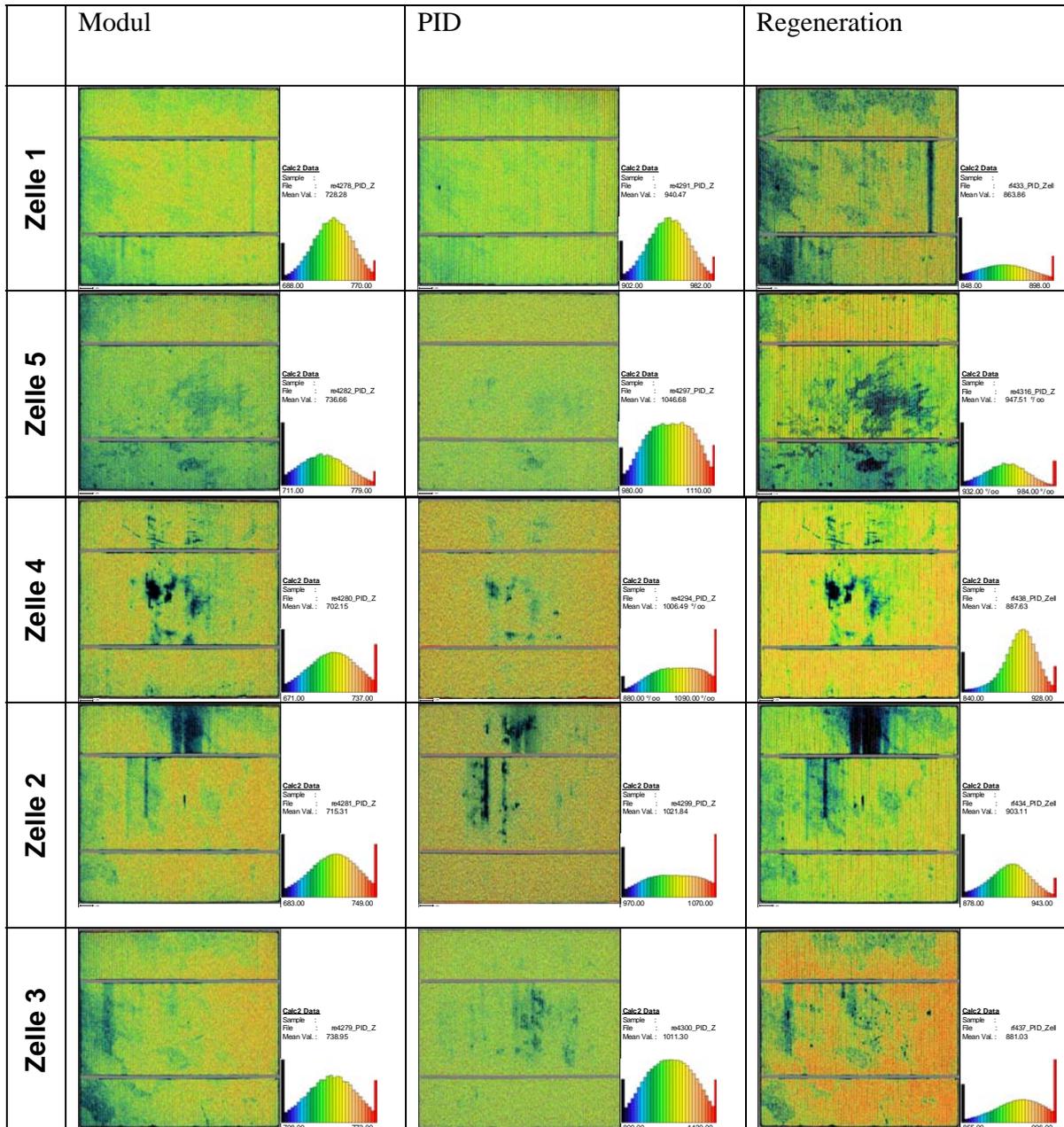


Abb. D.3: Übersichtsmatrix der Calc2-Bilder, berechnet nach Gl. (3.2). Die schwarzen Flächen repräsentieren Flächen mit Leistungsverlusten. Sie sind unabhängig vom Zellprozessschritt, d. h. es kommen durch die Prozessierung keine zusätzlichen Verluste hinzu.

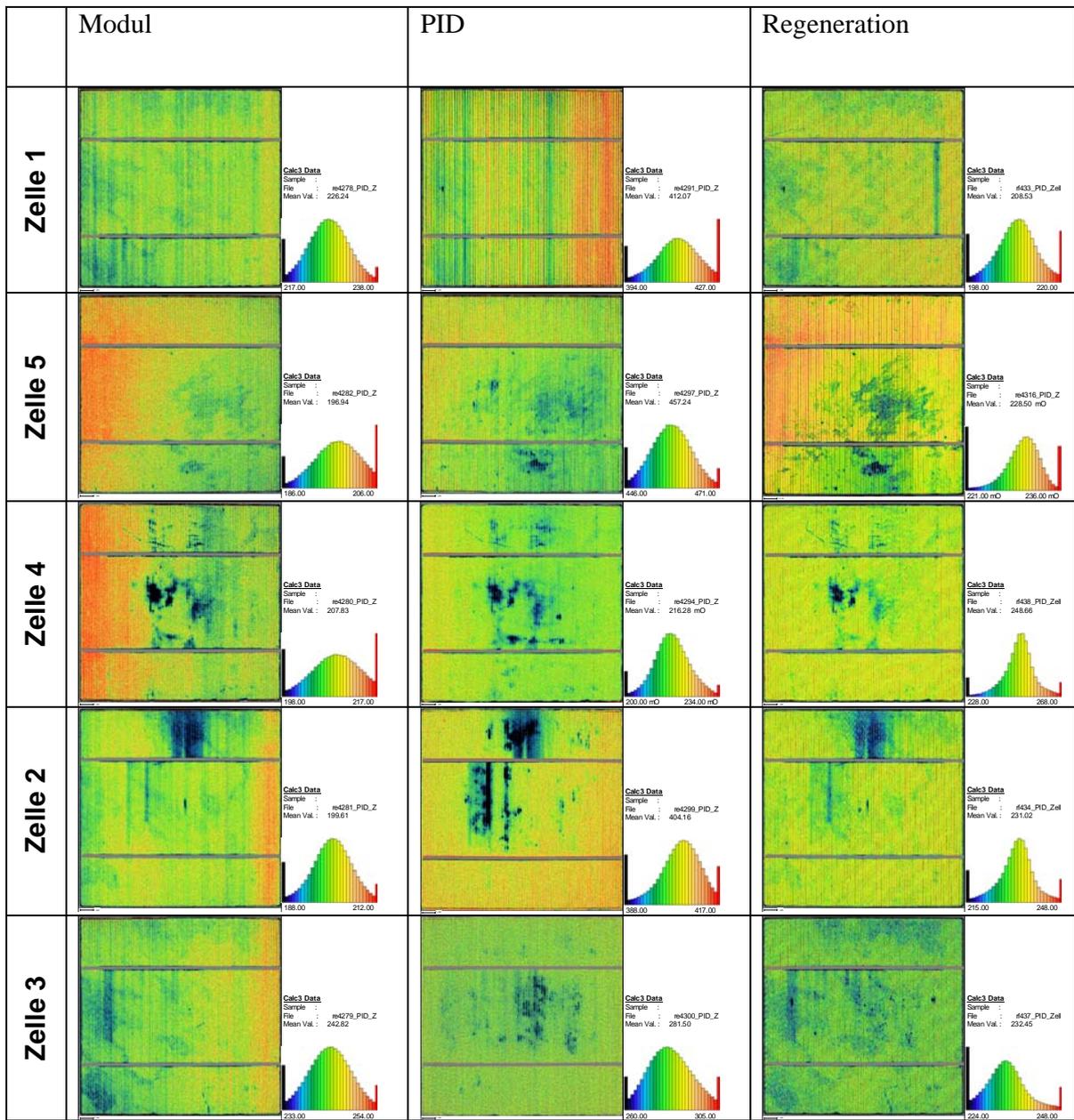


Abb. D.4: Übersichtsmatrix der Calc3-Bilder, berechnet nach Gl. (3.3). Wie erwartet sind diese Bilder vergleichbar mit Abb. D.3.

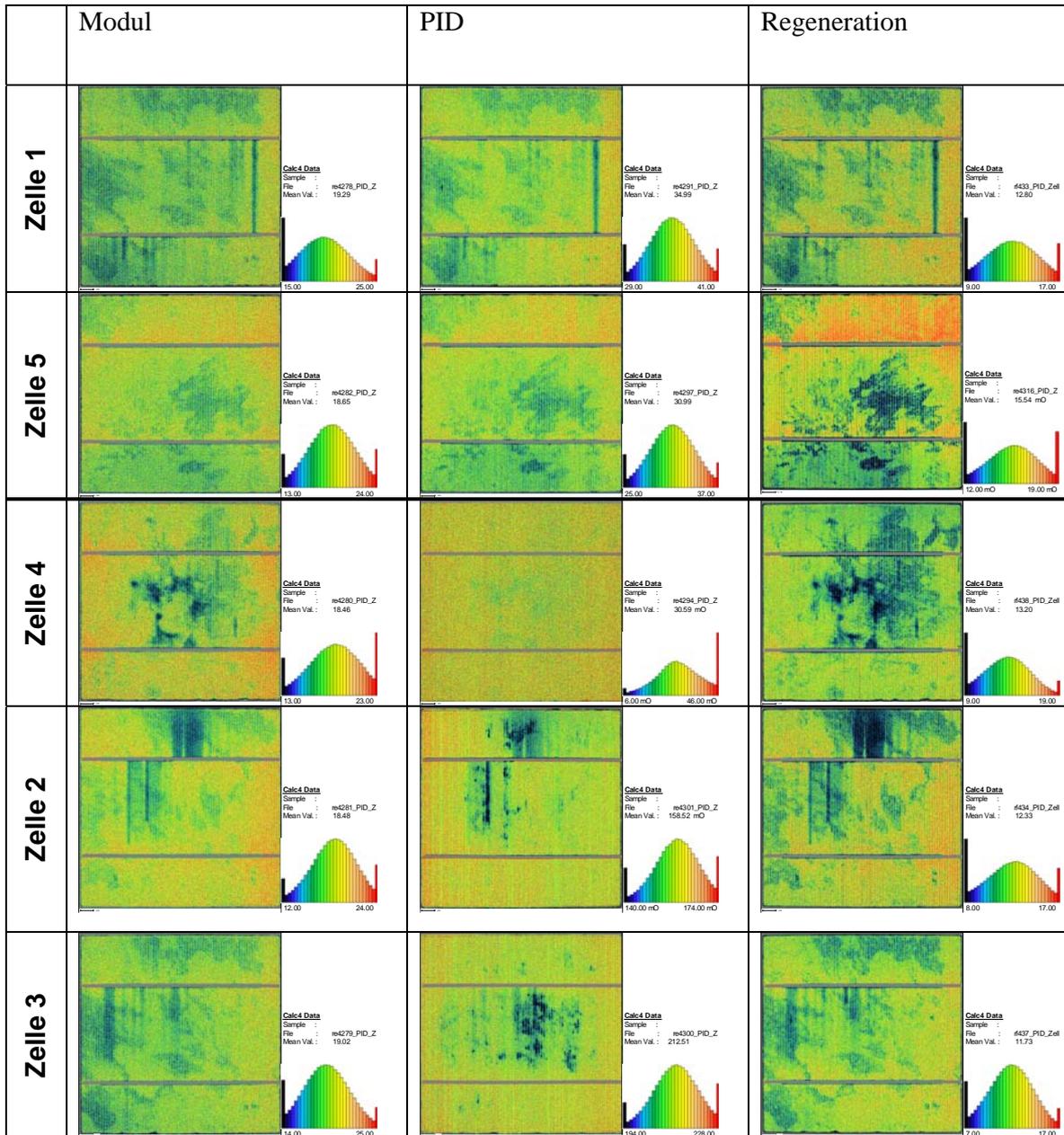


Abb. D.5: Übersichtsmatrix der Calc4-Bilder, berechnet nach Gl. (3.4).

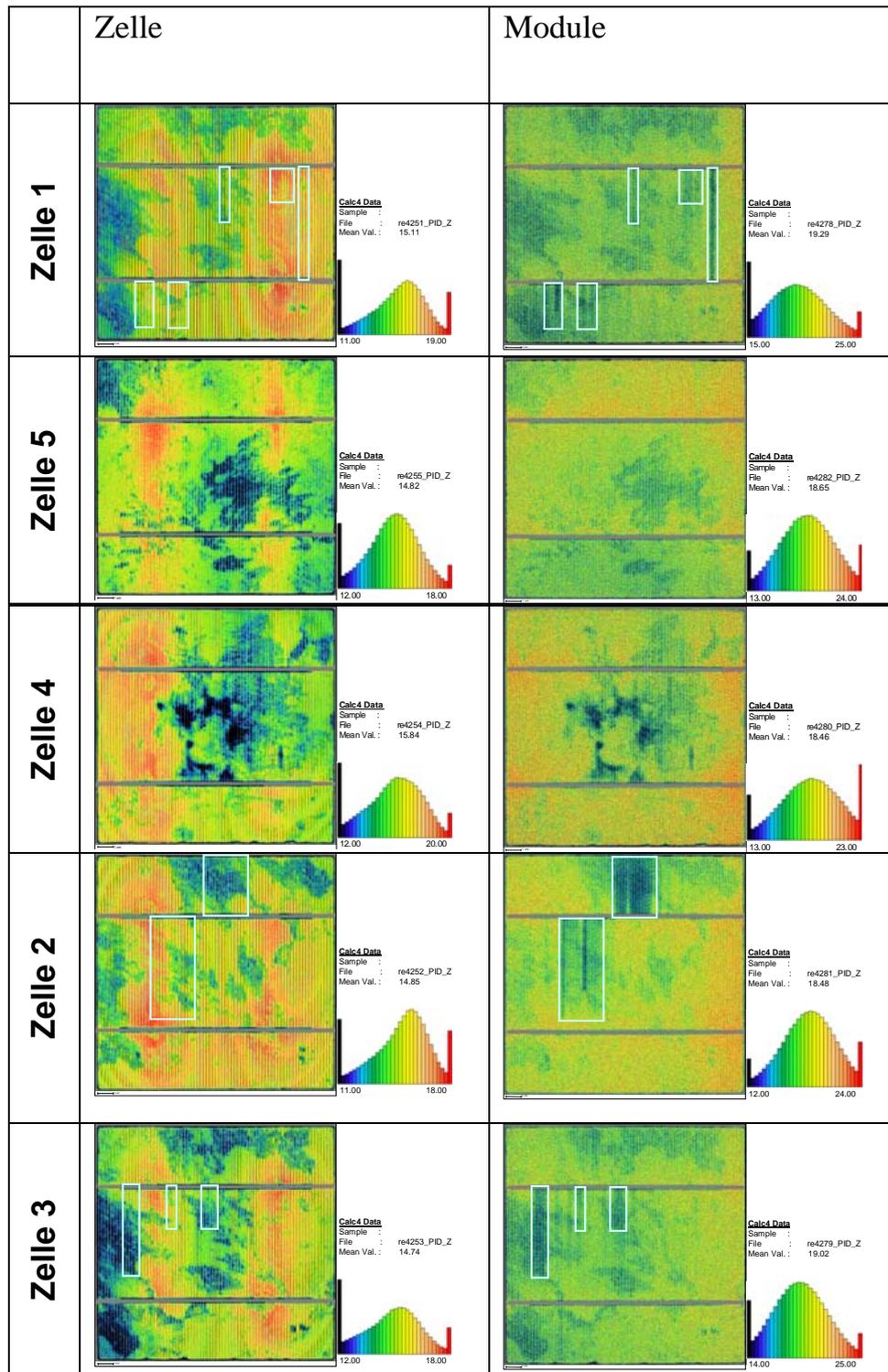


Abb. D.6: Calc4-Bilder vor (links) und nach der Modulverkapselung (rechts). Die weißen Rechtecke markieren Bereiche, welche nach der Modulverkapselung als zusätzliche Verlustbereiche hinzugekommen sind. Es handelt sich um typische Serienwiderstandsverluste, die auftreten, wenn die Gridfinger während des „Stringens“ vom „Mainbusbar“ abgetrennt werden. Diese Bereiche sind ebenfalls als schwarze Verlustbereiche in Abb. D.3, Abb. D.4 und Abb. D.5 zu sehen.

Literaturverzeichnis

- [1] D. Meadows, D. Meadows, and E. Zahn. *Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit*. Deutsche Verlags-Anstalt, 1972.
- [2] D. Meadows, J. Randers, and D. Meadows. *Limits to Growth – The 30-Year Update*. Chelsea Green Publishing Company, White River Junction, 2004.
- [3] R. Hirsch, R. Bezdek, and R. Wendling. Peaking of world oil production: Impacts, mitigation, & risk management. http://www.netl.doe.gov/publications/others/pdf/Oil_Peaking_NETL.pdf, 2005.
- [4] I. Allison and et al. *The Copenhagen Diagnosis, 2009: Updating the World on the Latest Climate Science*. The University of New South Wales Climate Change Research Centre (CCRC), Sydney, 2009.
- [5] L. Bernstein and et al. Climate change 2007: Synthesis report– an assessment of the intergovernmental panel on climate change. <http://www.ipcc.ch/>, 2007.
- [6] N. Stern. Stern review on the economics of climate change. http://www.hm-treasury.gov.uk/stern_review_report.htm, 2006.
- [7] E. von Weizsäcker, A. Lovins, and L. Lovins. *Faktor Vier, Doppelter Wohlstand – halbiertes Naturverbrauch. Der neue Bericht an den CLUB OF ROME*. Knauer, München, 1997.
- [8] D. Böhme and et al. Erneuerbare Energien in Zahlen – Nationale und internationale Entwicklung. *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)*, 2009.
- [9] R. Riester and et al. *Agrarmärkte Jahresheft 2009*. Landesanstalt für Entwicklung der Landwirtschaft und der Ländlichen Räume, Schwäbisch Gmünd, 2010.
- [10] R. Hirsch. The inevitable peaking of world oil production. *Atlantic Council Bulletin*, XVI, No. 3, 2005.
- [11] R. Hirsch. Mitigation of maximum world oil production: Shortage scenarios. *Energy Policy*, 36:881–889, 2008.
- [12] P. Almeida and P. Silva. The peak of oil production – timings and market recognition. *Energy Policy*, 37:1267–1276, 2009.
- [13] PV Insights. Weekly spot price data. <http://www.pvinsights.com>, 2011.

- [14] GCL-Poly Energy Holdings Limited. 2011 interim results. http://www.gcl-poly.com.hk/eng/investors/reporting_interim.php, 2011.
- [15] Wacker Polysilicon – Investor Relations. Polysilicon – key to the success of solar energy. *EU PVSEC Hamburg*, 2011.
- [16] SCHOTT Solar Thin Film GmbH. SCHOTT PROTECT™ ASI 107. *Data sheet*, 2011.
- [17] Heliatek GmbH. Heliatek erzielt mit 9,8% zertifizierter Zelleffizienz neuen Wirkungsgrad für organische Solarzellen. *press release*, 2011.
- [18] oerlikon solar AG. First 120 MW-ThinFab™ order for Oerlikon Solar. *press release*, 2011.
- [19] First Solar. Produktdatenblatt fs-387. *data sheet*, 2011.
- [20] Q.Cells SE. Q.smart 95. *data sheet*, 2011.
- [21] SUNPOWER. Produktdatenblatt solar module e20/333. *data sheet*, 2011.
- [22] Soitec. Concentrix technology for utility-scale solar power plants. *company brochure*, 2011.
- [23] A. McEvoy, T. Markvart, and L. Castaner. *Practical Handbook of Photovoltaics – Fundamentals and Applications*. Elsevier Ltd., Oxford, 2012.
- [24] S.M. Sze. *Physics of semiconductor devices*. Wiley & Sons, New York, 1981.
- [25] J.-M. Wagner, M. Hoppe, A. Schütt, J. Carstensen, and H. Föll. Injection-level dependent series resistance: Comparison of CELLO and photoluminescence-based measurements. *Energy Procedia*, 38:199–208, 2013.
- [26] J. Carstensen, A. Schütt, and H. Föll. Modelling of the distributed serial grid resistance: verification by CELLO measurements and generalization to other resistance mapping tools. In *Proc. 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, page 1CV.1.38, Valencia, 2008.
- [27] J. Carstensen, A. Schütt, and H. Föll. CELLO local solar cell resistance maps: Modeling of data and correlation to solar cell efficiency. In *Proc. 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, page 1CV.1.34, Milan, 2007.
- [28] A. Schütt, S. Keipert, J. Carstensen, and H. Föll. Modeling of the frequency dependence of the CELLO photo current for increasing measurement speed and identification of defect types. In *Proc. 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, page 1CV.1.35, Milan, 2007.
- [29] J. Carstensen, E. Foca, S. Keipert, H. Föll, M. Leisner, and A. Cojocar. New modes of FFT impedance spectroscopy applied to semiconductor pore etching and materials characterization. *Phys. Status Solidi A*, 205(11):2485–2503, 2008.

- [30] J. Carstensen, A. Schütt, and H. Föll. CELLO measurements with FFT impedance analysis: Drastic increase of measurement speed for analysis of local solar cell defects. In *Proc. 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, page 1AO.6.1, Valencia, 2008.
- [31] J. Carstensen, A. Schütt, and H. Föll. CELLO FFT impedance analysis as a routine tool for identifying various defect types on crystalline silicon solar cells. In *Proc. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, page 1AO.4.5, Hamburg, 2009.
- [32] J. Carstensen, A. Schütt, G. Popkirov, and H. Föll. CELLO measurement technique for local identification and characterization of various types of solar cell defects. *Phys. Status Solidi C*, 8(4):1342–1346, 2011.
- [33] L. Garchery, I. Sagnes, P. Warren, J.-C. Dupuy, and P. Badoz. Electron mobility enhancement in a strained Si channel. *Journal of Crystal Growth*, 157:367–372, 1995.
- [34] J. Serra, R. Gamboa, and A. Vallera. Optical absorption coefficient of polycrystalline silicon with very high oxygen content. *Materials Science and Engineering B*, 36:73–76, 1996.
- [35] A.A. Patrin and M.I. Tarasik. Optical-absorption spectrum of silicon containing internal elastic stresses. *Journal of Applied Spectroscopy*, 65(4):598–602, 1998.
- [36] J. Carstensen, A. Schütt, A. Pape, and H. Föll. CELLO measurements for local and global characterization of grid finger, contact, and emitter resistance losses of large area solar cells. In *Proc. 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, page 2CV.3.19, Valencia, 2010.
- [37] J. Carstensen, A. Schütt, G. Popkirov, and H. Föll. CELLO FFT impedance analysis of solar cells with a strong injection level dependence. In *Proc. 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, page 2CV.3.27, Valencia, 2010.
- [38] I. Cesar, E. Bende, G. Galbiati, L. Janßen, A. Weeber, and J.H. Bultmann. All-side SiN_x passivated mc-Si solar cells evaluated with respect to parasitic shunting. In *Proceedings, 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pages 1386–1391, Philadelphia, USA, 7-12 June 2009.
- [39] S. Dubois, N. Enjalbert, F. Warchol, and S. Martinuzzi. Is impurity gettering or passivation by hydrogen the improvement key of mc-Si solar cells during processing steps? *Materials Science and Engineering B*, 159-160:239–241, 2009.
- [40] J. del Cueto and T. McMahon. Analysis of Leakage Currents in Photovoltaic Modules under High-Voltage Bias in the Field. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 10:15–28, 2002.
- [41] J. Berghold, O. Frank, H. Hoehne, S. Pingel, B. Richardson, and M. Winkler. Potential Induced Degradation of solar cells and panels. In *Proc. 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, pages 3753–3759, Valencia, 2010.

- [42] V. Naumann, D. Lausch, A. Graff, M. Werner, S. Swatek, J. Bauer, A. Hähnel, O. Breitenstein, S. Großer, J. Bagdahn, and C. Hagendorf. The role of stacking faults for the formation of shunts during potential-induced degradation of crystalline Si solar cells. *Phys. Status Solidi RRL*, 7(5):315, 2013.
- [43] V. Naumann, D. Lausch, A. Hähnel, J. Bauer, O. Breitenstein, A. Graff, M. Werner, S. Swatek, S. Großer, J. Bagdahn, and C. Hagendorf. Explanation of potential-induced degradation of the shunting type by Na decoration of stacking faults in Si solar cells. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 120(A):383–389, 2014.
- [44] J. Carstensen, S. Mathijssen, G. Popkirov, and H. Föll. Solar cell efficiency analysis and defect identification using the CELLO-technique. In *Proc. 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, volume 865, page 1AV.2.40, Barcelona, 2005.
- [45] A. Schütt, J. Carstensen, H. Föll, S. Keipert-Colberg, and D. Borchert. Evaluation of passivation schemes of large area Si solar cells: separating serial resistance from other losses by the CELLO technique. In *Proc. 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, page 2BV.2.39, Hamburg, 2011.
- [46] S. Keipert-Colberg, N. Barkmann, C. Streich, A. Schütt, D. Suwito, P. Schäfer, S. Müller, and D. Borchert. Investigation of PECVD silicon oxide/silicon nitride passivation system concerning process influences. In *Proc. 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, page 2BV.3.61, Hamburg, 2011.
- [47] A. Schütt, J. Carstensen, G. Popkirov, and H. Föll. Mechanical stress induced effects for the characterization of large area solar cells. In *Proc. 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, page 2DO.3.3, Hamburg, 2011.
- [48] A. Schütt, J. Carstensen, J.-M. Wagner, and H. Föll. Local characterization of co-firing-induced inhomogeneities of conventional mc-si solar cells. In *Proc. 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, page 2CV.3.13, Paris, 2013.
- [49] F. Huster. Investigation of the alloying process of screen printed aluminum pastes for the BSF formation on Silicon solar cells. In *Proc. 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, pages 1466–1469, Barcelona, 2005.
- [50] A. Schütt, J. Carstensen, H. Föll, S. Keipert-Colberg, and D. Borchert. CELLO analysis of solar cells with silicon oxide/silicon nitride rear side passivation: parasitic shunting, surface recombination, and series resistance as rear side influences. In *Proc. 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, page 2BV.5.14, Frankfurt, 2012.
- [51] A. Schütt, J. Carstensen, J.-M. Wagner, H. Föll, M. Nguyen, and S. Klein. Spectrally resolved local CELLO characterization of tandem solar cells using linear and 2nd harmonic response analysis. In *Proc. 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, page 3DV.1.61, Frankfurt, 2012.
- [52] M. Nguyen, M. Stegmaier, A. Schütt, J. Carstensen, and H. Föll. The influence of the electrode sheet resistance on local photocurrent excitations in microcrystalline silicon thin film solar cells. In *Proc. 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, page 3DV.1.59, Frankfurt, 2012.

- [53] A. Schütt, J. Carstensen, J.-M. Wagner, and H. Föll. Influence of surface and process induced defects on potential-induced degradation and regeneration. In *Proc. 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, page 2BO.3.2, Paris, 2013.
- [54] J. Carstensen, G. Popkirov, J. Bahr, and H. Föll. CELLO: An Advanced LBIC Measurement Technique for Solar Cell Local Characterization. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 76:599, 2003.
- [55] S. Hoffmann and M. Koehl. Effect of humidity and temperature on the potential-induced degradation. *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, 22 (2):173–179, 2014.
- [56] E. Snow, A. Grove, B. Deal, and C. Sah. Ion Transport Phenomena in Insulating Films. *Journal of Applied Physics*, 36(5):1664–1673, 1965.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wäre nicht möglich gewesen ohne die Unterstützung von zahlreichen Menschen, denen ich an dieser Stelle herzlich danken möchte.

An erster Stelle danke ich Herrn Prof. Dr. Helmut Föll für die Möglichkeit zur Promotion in seiner Gruppe. Sie haben mich kontinuierlich unterstützt. Ihr Vertrauen in mich ließ mir den nötigen Spielraum für freies Forschen und Entwickeln von Lösungen. Ferner ermöglichten Sie mir die Teilnahme an vielen Konferenzen, so dass ich nicht nur etwas mehr von der Welt kennenlernen konnte, sondern auch die Ergebnisse einem großen Fachpublikum präsentieren konnte, beides hat mir sehr große Freude bereitet. Des weiteren konnte ich durch die Einbindung in den Lehrbetrieb viel von Ihnen lernen, wie das Bändigen großer Studentenmassen mit tiefem Wissen und dem nötigen Spritzer Humor. Ich habe fachlich und menschlich viel von Ihnen gelernt, vielen Dank.

Herrn Dr. Jürgen Carstensen bin ich zu sehr großem Dank verpflichtet für die wissenschaftliche Unterstützung dieser Arbeit. Von den vielen tiefen Diskussionen über Wissenschaft, diese Arbeit, Lehre und sonstige (nahezu alle) Themenbereiche habe ich viel lernen können. Besonders dankbar bin ich für das Auffinden und Aufzeigen potentieller Lösungsstrategien, wenn ich mich in einer Sackgasse zu befinden glaubte. Erwähnt sei auch die unglaubliche CELLO-Software, welche du nach meinen Wünschen und Bedürfnissen angepasst hast. Für die gemeinsame vertrauensvolle Zusammenarbeit möchte ich dir hiermit herzlich danken.

Herrn Dipl.-Ing. (FH) Jörg Bahr gilt mein Dank für die Verbesserungen der mechanischen und optischen Komponenten der CELLO-Hardware. Ich habe unglaublich viel über technische Problemlösungen und kleine und große Tricks und Kniffe von dir lernen dürfen. Auch dein kontinuierliches Streben nach effizienten (Arbeits-) Abläufen hat mich immer sehr beeindruckt. Wenn die Genauigkeit der CELLO-Messtechnik manchmal an maschinenbauliche Grenzen stieß, gelang es uns immer wieder, die bisherigen Grenzen zu überwinden und CELLO noch ein bisschen besser und rauschärmer zu machen. Vielen Dank.

Herrn Dr. habil. Georgi Popkirov gilt mein Dank für die Entwicklung, Implementierung und Pflege der elektrischen Komponenten der CELLO-Hardware. Du warst immer zur Stelle, wenn es galt, ein Rauschen zu verkleinern, ein Moiré-Muster auf den Bildern zu verhindern oder „einfach nur“ einen defekten OP auszutauschen. Von dir habe ich sehr viel über elektrische Schaltungen lernen können. Vielen Dank.

Frau Dr. Sinje Keipert-Colberg gilt mein Dank für die fruchtbare Zusammenarbeit und einen kontinuierlichen Strom an Solarzellen, welche es zu vermessen galt. Von dir konnte ich viele Details über die Solarzellenprozessierung lernen. Es war eine schöne und aufregende Zeit mit immer neuen Ideen und Zellkonzepten, welche zu vielen gemeinsamen Veröffentlichungen führte. Vielen herzlichen Dank.

Herrn Dipl.-Phys. Minh Nguyen gilt mein Dank für die tolle Kooperation mit der Firma Bosch, welche die Tandemzellen bereitstellte. Es freut mich, dass sich auch noch andere Doktoranden mit dem CELLO-Virus infiziert haben. Besten Dank, und hoffentlich kannst du noch lange auf CELLO-Messungen zurückgreifen.

Herrn Dr. Mohammad Hejjo Al Rifai danke ich recht herzlich für die erfolgreiche Zusammenarbeit, also für die PID-Proben und Experimente. Bei deinen Besuchen konnte ich immer etwas „Industrieluft“ schnuppern, was mir außerordentlich gefallen hat. Vielen Dank und alles Gute für dich.

Herrn Dr. Jan-Martin Wagner gilt mein Dank für die erfolgreiche Zusammenarbeit in Sachen Photolumineszenz. Wenn auch nicht Teil dieser Arbeit, war die gemeinsame fruchtbare Zusammenarbeit, welche sich auch in zahlreichen gemeinsamen Veröffentlichungen ausdrückt, sehr angenehm. Ferner durfte ich dank deines Korrekturlesens dieser Arbeit auch viel über die (neue) deutsche Rechtschreibung erfahren. Vielen Dank dafür.

Meinem Masterstudenten, Herrn M.Sc. Mostafa Jamel, danke ich für die tolle Zusammenarbeit und Führungserfahrungen, welche ich dadurch sammeln konnte. Es hat mir sehr viel Freude gemacht, mit dir zusammenzuarbeiten, und ich wünsche dir eine erfolgreiche Zukunft. Du hast es dir verdient. Vielen herzlichen Dank.

Frau Katrin Brandenburg danke ich für die jahrelange hervorragende administrative Unterstützung und auch für die orthographische Korrektur dieser Arbeit. Vielen Dank, du hast es immer geschafft, unangenehme bürokratische Hürden erträglich zu machen.

Des weiteren möchte ich an dieser Stelle allen aktuellen und ehemaligen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Allgemeine Materialwissenschaft für eure Unterstützung danken. Mir hat die gemeinsame Zeit mit euch zusammen, einschließlich der mannigfaltigen Gruppenaktivitäten, wie Fußballwetten etc., sehr gut gefallen. Es war eine sehr angenehme, produktive und bereichernde Atmosphäre, welche ich jeden Tag genossen habe und niemals vergessen werde. Vielen Dank.

Ein großer Dank gilt natürlich auch meinen Eltern Christa und Walter Schütt, welche mich während Studium und Promotion immer unterstützt haben und mit Rat und Tat an meiner Seite standen. Vielen herzlichen Dank dafür.

Ein ganz großes Dankeschön gilt natürlich auch meiner Frau Yik Shyan Siow. Danke für deine Unterstützung bei allen „ups and downs“, für deine Geduld, dein Verständnis und deinen motivierenden Zuspruch. Vielen herzlichen Dank.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich:

Diese Dissertation mit dem Titel „**Ortsaufgelöste Charakterisierung in der Photovoltaik mit der CELLO-Technik (Solar Cell Local Characterization)**“ habe ich noch nie, weder ganz noch teilweise im Rahmen eines anderen Promotionsverfahrens vorgelegt oder veröffentlicht. Ich habe mich bislang noch keiner mündlichen Prüfung im Rahmen eines Promotionsverfahrens unterzogen. Die vorliegende Arbeit habe ich ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist unter Einhaltung der Regeln guter wissenschaftlicher Praxis der Deutschen Forschungsgemeinschaft entstanden. Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts habe ich Unterstützungsleistungen von folgenden Personen erhalten:

Dr. Jürgen Carstensen, Lehrstuhl für Allgemeine Materialwissenschaft, CAU zu Kiel

Weitere Personen waren an der geistigen Herstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe eines Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Teile dieser Arbeit wurden bereits veröffentlicht:

Veröffentlichungen

1. J. Carstensen, A. Schütt, G. Popkirov und H. Föll, „Fast CELLO measurements for defect identification and loss quantification of solar cells“, in *Proc. 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2AO.3.4, Dresden (2006).
2. A. Schütt, J. Carstensen und H. Föll, „Quantitative analysis of local serial resistance and diode losses using the CELLO technique“, in *Proc. 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 1BV.2.36, Dresden (2006).
3. A. Schütt, S. Keipert, J. Carstensen und H. Föll, „Modeling of the frequency dependence of the CELLO photo current for increasing measurement speed and identification of defect types“, in *Proc. 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 1CV.1.35, Milan (2007).

4. J. Carstensen, A. Schütt und H. Föll, „CELLO local solar cell resistance maps: Modeling of data and correlation to solar cell efficiency“, in *Proc. 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 1CV.1.34, Milan (2007).
5. J. Carstensen, A. Schütt und H. Föll, „Modelling of the distributed serial grid resistance: verification by CELLO measurements and generalization to other resistance mapping tools“, in *Proc. 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 1CV.1.38, Valencia (2008).
6. J. Carstensen, A. Schütt und H. Föll, „CELLO measurements with FFT impedance analysis: Drastic increase of measurement speed for analysis of local solar cell defects“, in *Proc. 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 1AO.6.1, Valencia (2008).
7. W. Warta, M. Kasemann, J. Carstensen, A. Schütt und H. Föll, „Kontaktlose Charakterisierung von Halbleiterstrukturen durch gezielte Teilabschattung“, *Deutsche Patentanmeldung 10 2008 010 672.0-52*, 1 (2008).
8. B. Michl, M. Kasemann, J. Giesecke, M. Glatthaar, A. Schütt, J. Carstensen, H. Föll, S. Rein, W. Warta und H. Nagel, „Application of luminescence imaging based series resistance measurement methods in an industrial environment“, in *Proc. 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2DO.2.51, Valencia (2008).
9. M. Kasemann, M.C. Schubert, S. Kontermann, W. Kwapil, S. Rein, W. Warta, S. Glunz, T. Trupke, Y. Augarten, E. Pink, O. Breitenstein, A. Schütt, J. Carstensen und H. Föll, „Spatially Resolved Silicon Solar Cell Characterization using Infrared Imaging Methods“, in *Proc. 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, DOI: 10.1109/PVSC.2008.4922478, San Diego (2008).
10. M. Kasemann, W. Kwapil, B. Walter, J. Giesecke, B. Michl, M. The, J.-M. Wagner, J. Bauer, A. Schütt, J. Carstensen, S. Kluska, F. Granek, H. Kampwerth, P. Gundel, M.C. Schubert, R.A. Bardos, H. Föll, H. Nagel, P. Würfel, T. Trupke, O. Breitenstein, M. Hermle, W. Warta und S.W. Glunz, „Progress in silicon solar cell characterization with infrared imaging methods“, in *Proc. 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2DP.2.3, Valencia (2008).
11. J. Carstensen, A. Schütt und H. Föll, „CELLO FFT impedance analysis as a routine tool for identifying various defect types on crystalline silicon solar cells“, in *Proc. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 1AO.4.5, Hamburg (2009).
12. J. Carstensen, A. Abdollahinia, A. Schütt und H. Föll, „Characterization of the grid design by fitting of the distributed serial grid resistance to CELLO resistance maps and global IV curves“, in *Proc. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 1CV.4.33, Hamburg (2009).
13. J. Carstensen, A. Schütt, A. Pape und H. Föll, „CELLO measurements for local and global characterization of grid finger, contact, and emitter resistance losses of large area solar cells“, in *Proc. 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2CV.3.19, Valencia (2010).

14. J. Carstensen, A. Schütt, G. Popkirov und H. Föll, „CELLO FFT impedance analysis of solar cells with a strong injection level dependence“, in *Proc. 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2CV.3.27, Valencia (2010).
15. A. Schütt, J. Carstensen, G. Popkirov und H. Föll, „Mechanical stress induced effects for the characterization of large area solar cells“, in *Proc. 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2DO.3.3, Hamburg (2011).
16. J. Carstensen, A. Schütt, G. Popkirov und H. Föll, „CELLO measurement technique for local identification and characterization of various types of solar cell defects“, in *Phys. Status Solidi C* 8(4), 1342 (2011).
17. A. Schütt, J. Carstensen, H. Föll, S. Keipert-Colberg und D. Borchert, „Evaluation of passivation schemes of large area Si solar cells: separating serial resistance from other losses by the CELLO technique“, in *Proc. 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2BV.2.39, Hamburg (2011).
18. M. Kasemann, L.M. Reindl, B. Michl, W. Warta, A. Schütt, and J. Carstensen, „All-contactless measurement of series resistance distributions on solar cells with photoluminescence imaging“, in ISTFA 2011, *Proceedings from the 37th International Symposium for Testing and Failure Analysis*, 13, San Jose (2011).
19. J.-M. Wagner, J. Carstensen, A. Berhane, A. Schütt und H. Föll, „Series resistance analysis with the shaded luminescence technique“, in *Proc. 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2BV.2.51, Hamburg (2011).
20. S. Keipert-Colberg, N. Barkmann, C. Streich, A. Schütt, D. Suwito, P. Schäfer, S. Müller und D. Borchert, „Investigation of PECVD silicon oxide/silicon nitride passivation system concerning process influences“, in *Proc. 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2BV.3.61, Hamburg (2011).
21. A. Schütt, J. Carstensen, J.-M. Wagner, H. Föll, M. Nguyen und S. Klein, „Spectrally resolved local CELLO characterization of tandem solar cells using linear and 2nd harmonic response analysis“, in *Proc. 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 3DV.1.61, Frankfurt (2012).
22. A. Schütt, J. Carstensen, H. Föll, S. Keipert-Colberg und D. Borchert, „CELLO analysis of solar cells with silicon oxide/silicon nitride rear side passivation: parasitic shunting, surface recombination, and series resistance as rear side influences“, in *Proc. 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2BV.5.14, Frankfurt (2012).
23. C. Shen, H. Kampwerth, M. Green, T. Trupke, J. Carstensen und A. Schütt, „Luminescence based efficiency and other important parameters imaging of silicon solar cells“, in *Proc. 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2DO.3.2, Frankfurt (2012).
24. M. Kasemann, L.M. Reindl, B. Michl, W. Warta, A. Schütt und J. Carstensen, „Contactless qualitative series resistance imaging on solar cells“, in *IEEE Journal of Photovoltaics* 2, 181 (2012).

25. M. Nguyen, M. Stegmaier, A. Schütt, J. Carstensen und H. Föll, „The influence of the electrode sheet resistance on local photocurrent excitations in microcrystalline silicon thin film solar cells“, in *Proc. 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 3DV.1.59, Frankfurt (2012).
26. A. Schütt, J. Carstensen, J.-M. Wagner und H. Föll, „Influence of surface and process induced defects on potential-induced degradation and regeneration“, in *Proc. 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2BO.3.2, Paris (2013).
27. A. Schütt, J. Carstensen, J.-M. Wagner und H. Föll, „Local characterization of co-firing-induced inhomogeneities of conventional mc-Si solar cells“, in *Proc. 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2CV.3.13, Paris (2013).
28. O. Breitenstein, J. Carstensen, A. Schütt und J.-M. Wagner, „Comparison of local solar cell efficiency analysis performed by DLIT and CELLO“, in *Proc. 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2CV.3.15, Paris (2013).
29. M. Nguyen, A. Schütt, J. Carstensen und H. Föll, „Quantitative Defect Analysis on Solar Cells by Laser Beam Induced Current (LBIC) Measurements and 3D Network Simulations“, in *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 1493, Boston (2013).
30. J.-M. Wagner, M. Hoppe, A. Schütt, J. Carstensen und H. Föll, „Injection-level dependent series resistance: Comparison of CELLO and photoluminescence-based measurements“, *Energy Procedia* 38, 199 (2013).
31. J.-M. Wagner, J. Carstensen, A. Schütt und H. Föll, „Qualitative and quantitative evaluation of thin-film solar cells using solar cell local characterization“, *J. Appl. Phys.* 113, 064503 (2013).
32. C. Shen, H. Kampwerth, M. Green, T. Trupke, J. Carstensen und A. Schütt, „Spatially resolved photoluminescence imaging of essential silicon solar cell parameters and comparison with CELLO measurements“, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 109, 77 (2013).
33. J. Carstensen, J.-M. Wagner, A. Schütt und H. Föll, „Relation Between Local and Global I-V Characteristics: Restrictions for and by Series Resistance Averaging“, in *Proc. 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2BV.8.21, Amsterdam (2014).
34. J. Carstensen, J.-M. Wagner, A. Schütt, A. Krudopp und H. Föll, „Ohmic loss analysis for lateral balancing currents by CELLO and photoluminescence measurements“, in *Proc. 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2BO.2.6, Amsterdam (2014).

Andreas Schütt

Kiel, den 2. Oktober 2014

Kurzfassung in Deutsch

Im Rahmen dieser Arbeit wurden viele verschiedene Solarzellen (-typen) charakterisiert. Die dafür notwendigen Änderungen in der CELLO-Hard- und Software ermöglichten die Vermessung neuer Solarzellentypen und neuer Solarzellenparameter.

So wurde durch die Messungen dieser Arbeit klar, dass die mechanische Verspannung einen wesentlichen Einfluss auf die Absorption im tiefinfraroten Wellenlängenbereich (934 nm Wellenlänge, 55 μm Eindringtiefe) besitzt: Messreihen von CELLO-Messungen an lokal mechanisch verspannten Solarzellen zeigten, dass besonders die Phasenverschiebung des Photostroms besonders empfindlich auf mechanische Spannung reagiert. Ein Modell wurde diskutiert, welches Änderungen der Laser-Eindringtiefe, die durch mechanische Verspannung induziert und wellenlängenabhängig sind, spannungsinduzierten Änderungen der Siliziumbandlücke zuordnet. Dies ermöglichte die komplette Kurvenanpassung von 16 CELLO-Rasterbildern, um lokale Werte der relativen Änderung der Bandlücke als Messgröße für lokale mechanische Verspannung zu extrahieren.

Zur Analyse von Inhomogenitäten durch Co-Feuern bei Standard-Solarzellen wurden CELLO-Messungen verwendet, um lokale Bilder der Volumenlebensdauer τ_{life} , der Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit auf der Rückseite S_b und des Serienwiderstandes R_{SER} zu erzeugen. Die Ergebnisse und Strategien für eine effiziente Prozessoptimierung wurden diskutiert.

Multikristalline Si-Solarzellen (120 μm dick) mit einer Rückseitenpassivierung durch eine SiO/SiN-Schicht und Al-Punktkontakte werden lokal mit der CELLO-Technik charakterisiert. Durch die Kombination verschiedener Standardmessmodi ist es nun möglich, die Effekte von „Parasitic shunting“ von anderen Rückseiten-Effekten wie inhomogene Oberflächenpassivierung (z. B. durch die SiO/SiN-Schicht oder die Punktkontakte) oder Serienwiderstand zu separieren. Dies führte zu dem Schluss, dass die Serienwiderstandsverteilung der Rückseite für eine korrekte Interpretation von Photostromdaten, gemessen bei großen Wellenlängen, mit berücksichtigt werden muss.

Des Weiteren wurde die CELLO-Technik für die lokale Charakterisierung von a-Si/ μ -Si-Tandemsolarzellen verwendet. Durch Verwendung eines blauen und eines infraroten Lasers in einem konfokalen Strahl mit verschiedenen Modulationsfrequenzen der Lichtintensitäten können die Zellen hinsichtlich des lokalen „Current matching“ analysiert werden. Die Kombination dieser Daten mit z. B. der Antwort der zweiten Harmonischen, d. h. die lokale nicht lineare Wechselwirkung des Kurzschlussphotostromes, generiert von den beiden Lasern, ermöglicht die Analyse von zusätzlichen lokalen Eigenschaften, wie die Diodencharakteristik (Leckströme) von beiden Teilzellen oder lokale Serienwiderstände. Mehrere Beispiele für die Bestimmung von lokalen Defekten durch die Kombination von CELLO-Bildern wurden diskutiert.

Es fanden Untersuchungen zu PID und Regeneration an Zellen und Minimodulen statt. Hier wurden experimentelle Ergebnisse präsentiert und diskutiert, die darauf hinweisen, dass der Laminierungsprozess selbst und die Oberflächen-Topologie der Solarzelle auch PID fördern können. Ein Modell, welches die experimentellen Ergebnisse erklären kann, wurde vorgestellt. Aus diesen Erkenntnissen lassen sich Ideen ableiten, PID zu vermeiden.

Die Messergebnisse haben bewiesen, dass die CELLO-Technik flexibel und effektiv genutzt werden kann, um verschiedenste Solarzellentypen zu charakterisieren und somit einen Beitrag zur Verbesserung von Solarzellen (-konzepten) zu leisten.

Kurzfassung in Englisch

In this work many different solar cell (types) were characterized. Necessary adjustments in the CELLO hard- and software allowed to analyze new cell concepts and new cell parameters.

During the measurements it became clear that mechanical stress has a major effect on the absorption in the deepinfrared wavelength regime (934 nm wavelength, 55 μm penetration depth): Measurements on locally mechanically stressed solar cells showed that the phase shift of the photocurrent responds sensitively to mechanical stress. A model is discussed that correlates changes of the laser penetration depth, that are induced by mechanical stress and wavelength dependence, to stress induced changes of the silicon bandgap. That allows to extract local values of the relative change of the bandgap as quantity for locally induced mechanical stress from a complete fit of 16 CELLO maps.

To analyze inhomogeneities of co-fired standard solar cells CELLO measurements were used to extract maps of the bulk recombination lifetime τ_{life} , the surface recombination velocity of the rear S_{b} , and the series resistance R_{SER} . Results and strategies for an efficient process optimization were discussed.

Multicrystalline Si solar cells (120 μm thick) with a rear side passivation by a SiO/SiN stack and Al point contacts were locally characterized by the CELLO technique. By combining various standard measurement modes it is now possible to separate effects of parasitic shunting from other rear side effects like inhomogeneous surface passivation (e.g. by the SiO/SiN stack or the point contacts) or series resistance. This leads to the result that the series resistance distribution of the rear side has to be measured for interpreting the photocurrent data of long wavelengths correctly.

Additionally the CELLO technique was used for the local characterization of a-Si/ μ -Si tandem solar cells. By using a blue and an infrared laser in a confocal beam with various modulation frequencies of the light intensity the sub-cells can now be analyzed according to local current matching. The combination of these data with e.g. the 2nd harmonic response, i.e. the local non-linear interaction of the short-circuit photocurrent generated by both lasers, allows for an analysis of additional local properties like diode characteristics (leakage currents) of both sub-cells or local series resistances. Several examples for the determination of local defects by combining CELLO maps were discussed.

Analysis of PID degraded and regenerated cells and minimodules were performed. The experimental results presented and discussed here indicated that the lamination process itself and the surface topology of the solar cell can enhance PID. A model that can explain all our experimental results is presented. From these findings ideas can be derived in order to avoid PID.

The presented measurements and results demonstrate that the CELLO technique can be used flexibly and effectively to characterize various solar cell types and thus to contribute massively to the improvement of standard solar cells and new solar cell concepts.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Andreas Schütt
Anschrift: Gravelottestr. 5, 24116 Kiel
Geburtsdatum: 19.06.1980 in Kiel
Familienstand: verheiratet
Staats-
angehörigkeit: deutsch
Eltern: Christa und Walter Schütt

Schulbildung

1987-1988 Grundschule Probsteierhagen
1988-1991 Grundschule Heikendorf
1991-2000 Heinrich-Heine-Gynasium Heikendorf

Universitäre Ausbildung

Okt. 2000-Nov. 2005 Studium zum Dipl.-Ing. der Materialwissenschaften an der Technischen Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (zehn Semester)

Sept. 2004 Studienarbeit: „Aufbau eines Messplatzes zum Porenätzen bei ‚niedrigen Temperaturen‘ und erste Untersuchungen zum elektrochemischen Porenätzen in Halbleitern bei ‚niedrigen Temperaturen‘ “ an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel am Lehrstuhl für Allgemeine Materialwissenschaft (Prof. Dr. Föll)

Nov. 2005 Diplomarbeit: „Investigation of *in Situ* Formation of Two Amorphous Phases by Liquid Phase Separation“ an der Zhejiang Universität (VR China) (Prof. Dr. Jianzhong Jiang)

Dez. 2005-heute Promotionsstudent / wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Allgemeine Materialwissenschaft (Prof. Dr. Föll)