

Modellierung und Simulation des Energieertrags von Einfach- und Tandem-Solarzellen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der KIT-Fakultät für

Elektrotechnik und Informationstechnik
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

Dissertation

von

M.Sc. Jonathan Lehr
geb. in Hutthurm

Tag der mündlichen Prüfung: 28. Mai 2020

Hauptreferent:
Korreferent:

Prof. Dr. rer. nat. Uli Lemmer
Prof. Dr. rer. nat. Heinz Kalt



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung -
Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz (CC BY-SA 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Gliederung der Arbeit	3
2	Grundlagen	5
2.1	Halbleiter	5
2.1.1	Perowskit	7
2.1.2	Silizium	8
2.1.3	Organische Halbleiter	9
2.2	Einfach-Solarzellen	9
2.2.1	Perowskit-Solarzellen	12
2.2.2	Silizium-Solarzellen	14
2.2.3	Organische Solarzellen	16
2.3	Tandem-Solarzellen	17
2.3.1	Perowskit-Silizium-Solarzellen	18
2.3.2	Elektrische Verschaltung	21
2.3.3	Kenngößen und Energieertrag	22
2.4	Bifaziale Solarzellen	24
3	Simulationsmodell	27
3.1	Simulation der Strahlungsdichte	27
3.1.1	Direkte und diffuse Einstrahlung	27
3.1.2	Albedo-Modell	29
3.2	Optische Simulation	30
3.2.1	Methoden	31
3.2.2	Kristallines Silizium mit Textur	33
3.3	Elektrische Simulation	35
3.3.1	Eindiodenmodell	35
3.3.2	Temperaturmodell	38
3.4	Simulation des Energieertrags	39
3.4.1	Lichteinstrahlung	39
3.4.2	Berechnung des Energieertrags	41
3.4.3	Abschattungsverluste bei bifazialen Solarzellen	42
3.5	Zusammenfassung	45
4	Energieertrag von texturierten Perowskit-Silizium 2-Terminal Solarmodulen	47
4.1	Architekturen	47
4.2	Standardtestbedingungen	49
4.2.1	Optische Analyse	50
4.2.2	Elektrische Kenngößen	51

4.2.3	Optimierung der Schichtdicke	53
4.3	Energieertrag verschiedener Architekturen	55
4.3.1	Einfluss der Silizium-Textur	55
4.3.2	Klimazonen	57
4.3.3	Einfluss des Neigungswinkels	57
4.3.4	Optimierung der Perowskit-Bandlücke	60
4.4	Zusammenfassung und Ausblick	64
5	Energieertrag von bifazialen Solarmodulen	69
5.1	Architekturen	69
5.1.1	Silizium-Solarmodul	69
5.1.2	2-Terminal Perowskit-Silizium Solarmodule	71
5.1.3	4-Terminal Perowskit-Silizium Solarmodul	72
5.2	Lichtabsorption für Vorder- und Rückseite	74
5.3	Energieertrag der 2-Terminal Solarmodule	76
5.3.1	Currentmatching unter Albedo-Strahlung	77
5.3.2	Optimierung der Perowskit-Bandlücke	79
5.3.3	Architekturvergleich	82
5.4	Vergleich der Verschaltungen	82
5.5	Abschattungsverluste	86
5.6	Zusammenfassung und Ausblick	87
6	Organische Solarzellen mit optischem Resonator-Aufbau	91
6.1	Resonator-Aufbau	92
6.1.1	Architekturen	92
6.1.2	Verstärkung der Absorption	93
6.1.3	Optische Analyse	95
6.2	Leistung unter senkrechtem Lichteinfall	95
6.2.1	Elektrische Kenngrößen	95
6.2.2	Einfluss der Schichtdicke	97
6.3	Leistung unter schrägem Lichteinfall	98
6.3.1	Kurzschlussstromdichte	99
6.3.2	Energieertrag	100
6.3.3	Optimierung der Architektur	101
6.4	Zusammenfassung und Ausblick	103
7	Zusammenfassung und Ausblick	105
7.1	Zusammenfassung	105
7.2	Ausblick	107
	Abbildungsverzeichnis	109
	Tabellenverzeichnis	116
	Literaturverzeichnis	119

Publikationsliste	131
Danksagung	133

1 Einleitung

Eine sichere Energieerzeugung, die nachhaltig ist und somit zukünftig aufrecht erhalten werden kann, ist ein wichtiger Erfolgsfaktor für die Gesellschaft. Probleme stellt die Verwendung fossiler Energieträger für die Energiegewinnung dar, da diese zur Neige gehen können sowie über die Emission von Treibhausgasen zu globaler Erwärmung führen. Auch die Erzeugung von Kernenergie bietet hier aufgrund hoher Unfallrisiken keine Alternative. Das Ziel der Energiewende ist daher der dauerhafte und vollständige Übergang zu erneuerbaren Energien wie Windkraft, Biomasse, Wasserkraft, Solarenergie und Geothermie. Im Zuge der Energiewende steigt beispielsweise die Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien in Deutschland seit Jahren an. Im Jahr 2019 betrug der Anteil der erneuerbaren Energien an der Nettostromerzeugung in Deutschland 46%, wie in Abbildung 1.1 veranschaulicht ist. Die Solarenergie trug mit 9% im Vergleich zur Windkraft mit 24% noch vergleichsweise wenig zum Anteil der erneuerbaren Energien an der Nettostromerzeugung in Deutschland bei. Weltweit fallen der Anteil der erneuerbaren Energien sowie der Anteil der Solarenergie noch deutlich geringer aus [1]. Der Ausbau der Photovoltaik kann unter der Nutzung vieler Frei-, Dach- und Fassadenflächen vorangebracht werden. Um den Zielen der Energiewende näher zu kommen und die Stromerzeugung auf erneuerbare Energien umzustellen sowie den noch deutlich größeren allgemeinen Energieverbrauch mit erneuerbaren Energien zu bewältigen, muss der Ausbau dieser Energieformen weiterhin stark verfolgt werden.

Eine höhere Energieausbeute in der Photovoltaik kann neben dem Ausbau auch durch effizientere Solarzellen erreicht werden, die einen höheren Anteil der eingestrahlten Lichtleistung in elektrische Energie umwandeln. In der Forschung wird unter anderem an den Konzepten von Tandem-Solarzellen sowie von bifazialen Solarzellen für die Steigerung des Energieertrags (EY, engl. energy yield) gearbeitet. Da die auf dem Photovoltaik Markt vorherrschende Technologie auf Basis von Silizium (Si) mit einem Wirkungsgrad von 26.7% für Einfach-Solarzellen [3] bereits nahe an dem theoretisch möglichen Wirkungsgrad von 29.4% für Si-Solarzellen [4] gelangt ist, liegt ein großes Potential in der Erweiterung dieser Solarzellen durch die Kombination mit einem zweiten Absorber zu einer Tandem-Solarzelle. Mit der Materialklasse der Perowskite wurden in erstaunlich kurzer Zeit Solarzellen mit sehr hohen Wirkungsgraden erreicht [5]. Zudem können Perowskite kostengünstig mittels einfacher Depositionsmethoden wie Tintenstrahldruck hergestellt werden [6]. Bei der Materialklasse der Perowskite mit der Zusammensetzung ABX_3 (A und B sind Kationen, x ist ein Anion) kann durch Veränderung der Komposition die Bandlücke in einem Bereich von 1.2 bis 2.4 eV eingestellt werden [7] und damit optimal für eine Tandem-Solarzelle auf Basis von Si angepasst werden. Mit dem Konzept von bifazialen Solarzellen wird der EY durch die zusätzliche Einkopplung von elektromagnetischer Strahlung über die Rückseite der Solarzelle gesteigert [8]. Somit kann auch die Albedo-Strahlung zur Stromerzeugung genutzt werden. Bei Einfach- oder Tandem-Solarmodulen auf Basis von Si sind dazu nur geringfügige Modifikationen einer opaken Si-Solarzelle notwendig. Die Rückelektrode wird dabei durch einen transparenten Rückkontakt ersetzt und die Solarzelle wird verkapselt und mit Glas abgeschlossen.

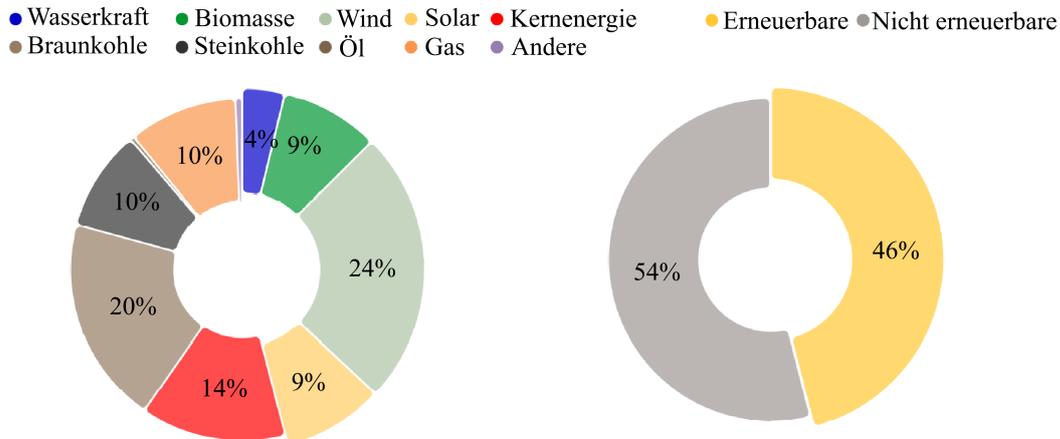


Abbildung 1.1: Nettostromerzeugung in Deutschland und Anteile der Energieträger im Jahr 2019 [2].

Neben der Optimierung der Bauteileffizienz kann die Stromerzeugung in der Photovoltaik indirekt durch die Analyse des EY eines Bauteils gesteigert werden. Eine solche Analyse gibt einerseits Aufschluss über die zu erwartende generierte Energie und andererseits kann das Design des Bauteils an realistische Bedingungen angepasst werden [9], um den EY zu erhöhen. Insbesondere die Einstrahlung auf die Solarzelle unterscheidet sich unter realistischen Bedingungen von den Bedingungen im Labor. Sowohl die Intensität, als auch der Einfallswinkel und das Spektrum der Strahlung sowie die Albedo des Bodens haben Einflüsse auf den EY einer Solarzelle [10, 11]. Weiter variiert die Einstrahlung für Orte in unterschiedlichen klimatischen Zonen. Die genannten Faktoren können daher Auswirkungen auf das optimale Design von Tandem-Solarzellen haben. In den Bauteilen spielt zudem die Struktur der Oberfläche eine Rolle für die Lichtausbreitung. In der vorliegenden Arbeit wird unter anderem auf die Analyse des EY von Perowskit/Si Tandem-Solarmodulen eingegangen.

Organische Solarzellen erweitern als Dünnschicht-Technologie den möglichen Anwendungsbereich der Photovoltaik. Die Solarzellen sind wenige 100 nm dick und können beispielsweise als semi-transparente Solarzellen Anwendung in Fenstern von Gebäudefassaden finden [12, 13, 14]. Organische Solarzellen können durch die Flexibilität der Schichten auch in Textilien und Taschen integriert werden [15]. Aufgrund der einfachen Herstellung mittels Beschichtungs- und Druckverfahren [16] sind die Solarzellen zudem kostengünstig. Die Wirkungsgrade fallen hingegen im Vergleich zu Si oder Perowskiten geringer aus.

Die Effizienz von organischen Solarzellen kann durch Konzepte des Lichtmanagements gesteigert werden, um die Lichtabsorption in der dünnen Absorberschicht zu erhöhen. Beispielsweise kann die Absorption durch das Einbringen von Schichten mit Nanopartikeln [17] oder durch die Strukturierung der Elektroden [18] erhöht werden, indem der effektive Weg des Lichts im Absorber durch Streuung des Lichts im Schichtstapel verlängert wird. Das Einbringen einer dünnen Metallelektrode an der Frontseite, mit dem ursprünglichen Ziel, die Flexibilität von organischen Solarzellen zu erhöhen, führte zu einem weiteren Konzept des Lichtmanagements. Hierbei wird die Lichtabsorption durch Resonanz der elektromagnetischen Wellen erhöht [19]. Die weitere Integration der Metallelektrode in Verbindung mit einem Dielektrikum in den Aufbau

organischer Solarzellen führte zu einer Steigerung der Lichtabsorption über einen spektralen Bereich hinweg [20]. In dieser Arbeit wird das Konzept des Resonator-Aufbaus von organischen Solarzellen unter winkelabhängiger Lichteinstrahlung untersucht sowie die Auswirkungen auf den EY von organischen Solarzellen unter realistischen Bedingungen.

1.1 Gliederung der Arbeit

Zu Beginn der Arbeit wird in Kapitel 2 auf die Grundlagen eingegangen, die für das Verständnis dieser Arbeit notwendig sind. Dabei werden die Eigenschaften der Halbleiter beschrieben, auf denen die Solarzellen in dieser Arbeit basieren. Es folgt eine Beschreibung der verschiedenen Solarzellentypen Einfach-, Tandem- und bifaziale Solarzellen. Bei den Tandem-Solarzellen werden zudem verschiedene Verschaltungen behandelt, die Zwei-Terminal- (2T, engl. two-terminal) und die Vier-Terminal-Verschaltung (4T, engl. four-terminal).

Im folgenden Kapitel 3 wird das Simulationsmodell für die Analyse des EY von Solarzellen beschrieben, welches unter anderem im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde. Hierbei wird auf die verschiedenen Module des Simulationsmodells eingegangen, welche unter anderem die Berechnung der optischen und elektrischen Eigenschaften der Solarzelle sowie die Berechnung der Einstrahlung und Temperatur miteinschließen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit werden beginnend in Kapitel 4 über den EY von opaken Perowskit/Si 2T Solarmodulen beschrieben. Hierbei wird nach einer Einführung verschiedener relevanter Architekturen der optimale Wirkungsgrad unter Laborbedingungen abgeschätzt sowie Limitierungen der 2T-Verschaltung aufgezeigt. Anschließend wird der EY der verschiedenen Architekturen unter realistischen Bedingungen abgeschätzt und daraus Implikationen für das Design der Perowskit/Si 2T Solarmodule abgeleitet. Es wird dabei eine Optimierung der Schichtdicke und der Bandlücke des Perowskits durchgeführt. Die Tandem-Solarmodule werden zudem mit aktuellen Si-Solarmodulen verglichen.

Die Untersuchung von bifazialen Perowskit/Si Tandem-Solarmodulen wird in Kapitel 5 unter dem Einfluss von Albedo-Strahlung erläutert. Dabei werden verschiedene Verschaltungen und Architekturen der bifazialen Tandem-Solarmodule untereinander und mit bifazialen Si-Solarmodulen sowie mit opaken Referenzbauteilen verglichen. Nach einer detaillierten Analyse der Lichtabsorption für die Vorder- und Rückseite der bifazialen Solarmodule werden Einflüsse der Einstrahlung unter realistischen Bedingungen auf den EY der Solarmodule untersucht sowie eine Optimierung der Bauteile vorgenommen. Schließlich wird der Einfluss von Abschattungsverlusten auf den EY von bifazialen Perowskit/Si Tandem-Solarmodulen untersucht.

In Kapitel 6 wird der Nutzen von organischen Einfach-Solarzellen mit einem optischen Resonator-Aufbau für den Einsatz unter realistischen Bedingungen untersucht. Nachdem die Architektur einer Solarzelle mit Resonator-Aufbau vorgestellt wurde, wird zunächst eine Analyse der Lichtabsorption unter senkrechtem sowie unter schrägem Lichteinfall vorgenommen und mit der konventionellen Architektur für organische Solarzellen verglichen. Anhand des Simulationsmodells wird der EY sowie das Verhalten bei geneigter Solarzelle untersucht. Abschließend wird eine Optimierung der Architektur für schrägen Lichteinfall vorgenommen, um das maximale Potential des untersuchten Resonator-Aufbaus abzuschätzen.

In der Zusammenfassung und im Ausblick in Kapitel 7 wird auf die wichtigsten Ergebnisse und Schlussfolgerungen dieser Arbeit eingegangen und ein Ausblick für mögliche weiterführende Untersuchungen gegeben.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden Grundlagen zu Einfach- und Tandem-Solarzellen auf Basis von Si, Perowskit und organischen Halbleitern beschrieben, die elementar für das Verständnis dieser Arbeit sind. Nach einer Einführung aller Halbleiter, welche die Absorber der diskutierten Solarzellen bilden, wird zunächst auf die Kenngrößen von Einfach-Solarzellen eingegangen. Darüber hinaus wird der Aufbau von Perowskit-, Si- und organischen Solarzellen beschrieben sowie teilweise auf die Herstellung und den Wirkungsgrad der Solarzellen eingegangen. Anschließend werden das Prinzip und die Verschaltungen von Tandem-Solarzellen beschrieben, welche unter anderem im Fokus dieser Arbeit liegen. Nach der Einführung von Perowskit/Si Tandem-Solarzellen wird schließlich auf bifaziale Solarzellen eingegangen und deren Aufbau und Vorteile erläutert.

2.1 Halbleiter

Der weit verbreitetste Halbleiter in der Photovoltaik ist der anorganische Elementhalbleiter Si. Weitere verwendete Halbleiter in Solarzellen sind z.B. die Verbindungshalbleiter Galliumarsenid (GaAs), Cadmiumtellurid (CdTe) und Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid Cu(In,Ga)Se_2 . Es werden auch organische Halbleiter, bestehend aus Kohlenstoff- (C, engl. carbon) und Wasserstoff-Verbindungen, eingesetzt und seit jüngster Zeit sogenannte Perowskite als hybride Materialien, bestehend aus anorganischen und organischen Verbindungen.

Im Folgenden werden die grundlegenden Prozesse Lichtabsorption und Ladungsträgertransport für die Energiekonversion im Halbleiter näher erläutert. Bei anorganischen sowie bei hybriden Materialien bildet sich im Festkörper aufgrund der mikroskopisch kristallinen Struktur eine regelmäßige Bandstruktur der elektronischen Zustände für Elektronen und Löcher aus. Hierbei beschreibt das Bändermodell die energetische Lage von Bändern erlaubter Zustände für Elektronen im Festkörper. Die Besetzung der elektronischen Zustände wird mit der temperaturabhängigen und energieabhängigen Fermi-Dirac-Verteilung beschrieben. Die Fermi-Dirac-Verteilung gibt demnach die Besetzungswahrscheinlichkeit der elektronischen Zustände an. Dabei ist die Besetzungswahrscheinlichkeit an der sogenannten Fermi-Energie E_F für Temperaturen mit $T > 0$ K. Im Halbleiter liegt E_F im Gegensatz zu Metallen zwischen zwei Bändern. Aufgrund dieser Lage ist bei Temperaturen im Bereich der Raumtemperatur der Großteil der elektronischen Zustände im Valenzband, dem Band unterhalb E_F , besetzt und im Leitungsband, dem Band oberhalb E_F , unbesetzt. Die relative Lage von E_F und den Bändern ist in Abbildung 2.1 veranschaulicht. Der energetische Abstand der Bänder ist bei Halbleitern im Vergleich zu Isolatoren gering und liegt für die genannten Halbleiter im Bereich von 1.1 bis 1.8 eV.

In organischen Materialien können die elektronischen Zustände sowie der Ladungsträgertransport nicht über das klassische Bändermodell beschrieben werden. Aufgrund der Unordnung der organischen Moleküle sind die elektronischen Zustände in diesen Materialien energetisch ungeordnet. Die elektronischen Zustände entstehen durch die Bindungen der Atome innerhalb der organischen Moleküle. Bei der Bindung von C-Atomen wird zwischen unterschiedlichen Bindungen

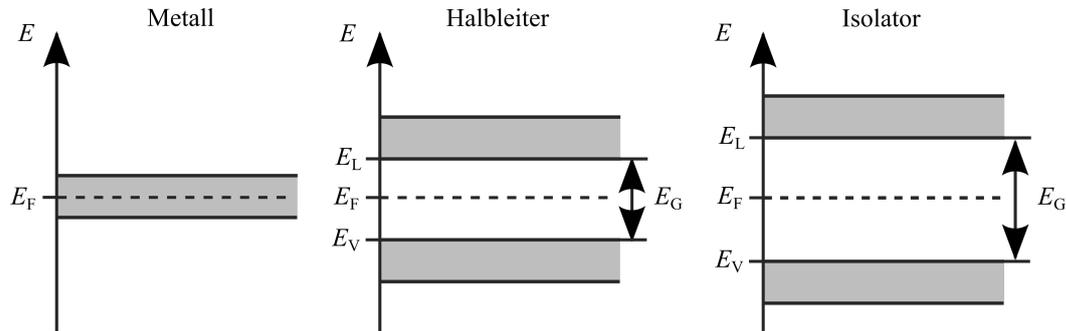


Abbildung 2.1: Lage der Bänder und der Fermi-Energie E_F in anorganischen Metallen, Halbleitern und Isolatoren. Bei Halbleitern und Isolatoren liegt E_F im Bereich der Bandlücke E_G . E_G reicht von der Valenzbandkante E_V bis zur Leitungsbandkante E_L .

wie z.B. der π - und π^* -Bindung unterschieden. Alle Orbitale der C-Atome, so auch die π - und π^* -Orbitale, haben unterschiedliche Energien. Bei der Bindung von C-Atomen ist das π -Orbital das energetisch höchste von einem Elektron besetzte Orbital des Moleküls (HOMO, engl. highest occupied molecular orbital) und das π^* -Orbital das niedrigste unbesetzte Orbital des Moleküls (LUMO, engl. lowest unoccupied molecular orbital). Die Energiedifferenz zwischen den π - und π^* -Orbitalen liegt in organischen Molekülen üblicherweise im Bereich von 1.5 bis 3 eV [21].

Elektromagnetische Strahlung im optischen und infraroten Spektralbereich mit einer Photonenergie $E_{\text{Photon}} > E_G$ des Halbleiters kann absorbiert werden, indem ein Photon ein Elektron aus dem Valenzband in das Leitungsband anregt, oder in organischen Halbleitern vom HOMO-Niveau in das LUMO-Niveau anregt. Da Photonen mit geringerer Energie keine freien Ladungsträger bzw. in organischen Halbleitern Exzitonen durch Photon-Absorption erzeugen können, ist das Absorptionsspektrum eines Halbleiters durch die Bandlücke festgelegt.

Beim Transport von Ladungsträgern in den Halbleitern Si und Perowskit treten aufgrund ihrer kristallinen Struktur und vergleichsweise kleinen Zahl an Kristalldefekten nur geringe elektrische Verluste auf. Die mittlere freie Weglänge, die ein photo-generierter Ladungsträger bis zur Rekombination zurücklegt, wird als Diffusionslänge $L = \sqrt{D\tau}$ bezeichnet, mit der Diffusionskonstanten D und der Lebenszeit τ des Ladungsträgers. Mit großen Diffusionslängen der freien Ladungsträger (Si: 100-300 μm [22], Perowskit: 0.1-1.2 μm [23, 24]) tritt bei typischen Schichtdicken nur geringfügig strahlende Rekombination von Elektronen und Löchern auf. Auch Shockley-Read-Hall-Rekombination an Störstellen tritt bei dieser geringen Defektdichte kaum auf. Für die Halbleiter Si und Perowskit kann demnach näherungsweise eine vollständige Sammlungseffizienz der Ladungsträger angenommen werden.

Der Ladungsträgertransport in organischen Materialien ist aufgrund ungeordneter Moleküle ineffizient. Die Moleküle im organischen Halbleiter unterscheiden sich beispielsweise hinsichtlich Abstand, Größe und Orientierung. Innerhalb eines Moleküls ist das Elektron aufgrund der Überlappung der Orbitale delokalisiert und somit sehr beweglich. Aufgrund der ungeordneten organischen Moleküle befinden sich jedoch die elektronischen Zustände der verschiedenen Moleküle nicht auf demselben Energieniveau. Beim intermolekularen Transport im elektrischen Feld hüpfen Elektronen durch Aufnahme von thermischer Energie auf benachbarte Moleküle oder geben dabei thermische Energie ab. Die effektive Mobilität freier Elektronen ist um Größenordnungen geringer als in anorganischen Halbleitern (PC₇₁BM: $< 0.1 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ [25], Si: $\sim 1400 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, Perow-

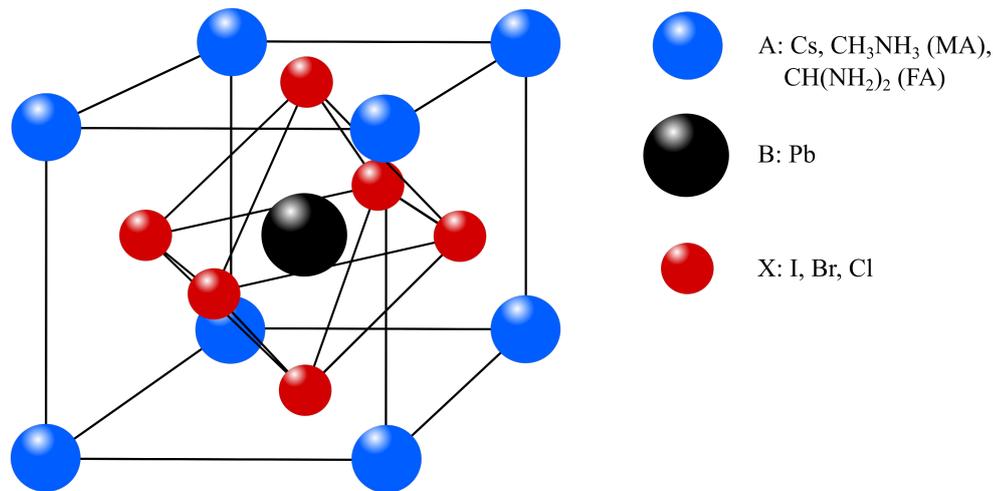


Abbildung 2.2: Gitterstruktur der Perowskite mit der Form ABX_3 . Der Gitterplatz A ist in der Regel mit Cs oder den organischen Molekülen Methylammonium (MA) oder Formamidinium (FA) besetzt, B mit Pb und X mit den Halogeniden I, Br oder Cl.

skit: $\sim 70 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ [26, 27]). Bei dem Akzeptor PC_{71}BM (engl. [6,6]-phenyl C71 butyric acid methyl ester) handelt es sich um ein Molekül, welches Elektronen von einem Donator-Molekül aufnimmt und diese dann an die Kontakte transportiert. Die Mobilität in organischen Halbleitern ist stark abhängig von der Temperatur und dem elektrischen Feld. Aufgrund der vergleichsweise geringeren Mobilität in organischen Halbleitern rekombiniert ein größerer Anteil der Ladungsträger als in anorganischen Halbleitern. Es tragen daher nicht alle photo-generierten Ladungsträger zum Strom der Solarzelle bei. Bei der Berechnung der J_{SC} in organischen Solarzellen wird daher im Folgenden eine Sammlungseffizienz von 90% angenommen.

2.1.1 Perowskit

Die Materialklasse der Perowskite zog innerhalb der vergangenen Jahre großes Interesse in der Photovoltaikforschung auf sich und es konnten innerhalb kürzester Zeit Solarzellen mit bemerkenswerten Wirkungsgraden von bis zu 25.2% erzielt werden [28, 5]. Im Folgenden werden grundlegende Eigenschaften der Kristallstruktur und Zusammensetzung von Metall-Halogenid-Perowskiten erläutert. In der Natur kommt der Perowskit als Kristall mit orthorhombischem Kristallsystem zusammengesetzt aus CaTiO_3 vor. Die Klasse der Perowskite umfasst Kristalle mit der chemischen Formel ABX_3 , wobei die Atome A und B Kationen und X Anionen sind. Dabei ist die Kristallstruktur in der Regel kubisch. Die Gitterstruktur der Perowskite ist in Abbildung 2.2 gezeigt. Bei den für diese Arbeit relevanten Perowskiten besteht der Gitterplatz A aus dem organischen Molekül Methylammonium (MA), B aus Pb und X aus einer Zusammensetzung der Halogenide Br und I.

Perowskite sind im Allgemeinen Mischsysteme und bestehen aus organischen und anorganischen Stoffen. Eine Variation der Br- und I-Anteile beeinflusst die Energien des Valenz- und des Leitungsbands. Durch gezieltes Einstellen des Br- und I-Gehalts können Perowskite mit einer Bandlücke im Bereich von ca. 1.5 bis 2.2 eV erzeugt werden [29, 30]. In diesem Bereich liegt die

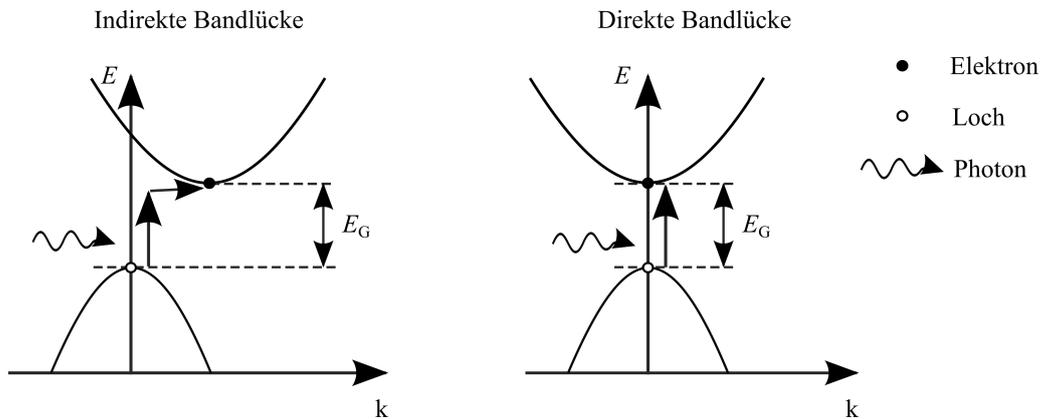


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung einer indirekten Bandlücke und einer direkten Bandlücke. Bei der Absorption eines Photons ist im Fall der indirekten Bandlücke für die Anregung eines Elektrons aus dem Valenzband in das Leitungsband ein zusätzlicher Impulsübertrag durch z.B. ein Phonon nötig. Die Energie des Photons E_{ph} muss mindestens gleich oder größer E_G sein.

ideale Bandlücke für maximalen Wirkungsgrad einer Tandem-Solarzelle auf Basis von Si [31], was diese Perowskite vielversprechend für eine Kombination mit Si macht [32].

Neben der einstellbaren Bandlücke bestehen weitere Vorteile in hoher Lichtabsorption aufgrund eines hohen Absorptionskoeffizienten [33], damit verbunden in geringem Materialverbrauch sowie in kostengünstigen Herstellungsverfahren [34]. Perowskite haben trotz ihres relativ geringen Pb-Gehalts den Nachteil, dass bei Beschädigung der Verkapselung in Modulen Pb in die Umwelt gelangen könnte. An der Substitution von Pb durch Sn wird seit einiger Zeit gearbeitet [35]. Die Schwierigkeit dabei ist, stabile Perowskit-Solarzellen mit einer möglichst hohen Effizienz zu erzielen. Beispielsweise konnten inzwischen Chen *et al.* mit Pb-freien Perowskiten der Zusammensetzung $\text{CsSn}_{0,5}\text{Ge}_{0,5}\text{I}_3$ Solarzellen mit einem Wirkungsgrad von 7.1% erzielen, die nach 500 h in Betrieb eine Abnahme der Effizienz von weniger als 10% relativ aufwiesen [36].

2.1.2 Silizium

Der globale Markt in der Photovoltaik wird seit jeher durch die Produktion von Solarzellen auf Basis von Si dominiert [37]. Die Produktion von Si-Solarzellen besteht zum Großteil aus polykristallinem Si (poly-Si) und monokristallinem Si (c-Si, engl. crystalline silicon). Aufgrund seiner hohen Reinheit werden die effizientesten Si-Solarzellen auf Basis von c-Si hergestellt. Der aktuelle Weltrekord wurde von Yoshikawa *et al.* mit einem Wirkungsgrad von 26.7% erzielt [3]. Der Festkörper Si bildet über kovalente Bindung zwischen den Atomen eine stabile Diamantstruktur aus. Die Eigenschaften des Halbleiters zeichnen sich durch hohe Ladungsträger-Mobilitäten und große Diffusionslängen aus. Das elektrische Feld zur Trennung der photo-generierten freien Ladungsträger wird durch Dotierung von Schichten erzeugt. Schon eine Dotierung im Randbereich des Si ermöglicht die Sammlung von Elektronen und Löchern über einen großen intrinsischen Bereich hinweg. Si weist eine indirekte Bandlücke auf. Die Wellenvektoren des Leitungsband-Minimums und Valenzband-Maximums im Impulsraum sind verschieden, wie in Abbildung 2.3 veranschaulicht wird. Die Absorption der Photonen im Blau- bis Infrarot-Bereich erfolgt nur bei gleichzeitigem Impulsübertrag z.B. von dem Gitter in Form eines Phonons auf das Photon, da

die Energie dieser Photonen nicht für einen direkten Übergang der Elektronen ausreicht. Der Prozess ist in Halbleitern mit direkter Bandlücke (siehe Abbildung 2.3) wahrscheinlicher, da die Photon-Anregung über die Energie der Bandlücke E_G ohne Beteiligung eines Phonons erfolgen kann. Aufgrund der indirekten Bandlücke von c-Si ist der Absorptionskoeffizient im Vergleich zu Materialien in der Dünnschicht-Technologie wie z.B. amorphes Si (a-Si), Perowskit oder organische Systeme klein. Typische Schichten von c-Si liegen im Bereich von bis zu 200 μm und sind um Größenordnungen dicker als von a-Si und Perowskiten. Die Bandlücke von c-Si ist ca. 1.1 eV. Das a-Si und Perowskite weisen eine deutlich stärkere Lichtabsorption aufgrund ihrer direkten Bandlücken auf [38]. Der Spektralbereich der Absorption in a-Si ist jedoch kleiner als bei c-Si, da die Bandlücke von a-Si im Bereich von 1.7 bis 1.8 eV liegt [39].

2.1.3 Organische Halbleiter

Organische Solarzellen zeichnen sich unter anderem durch die Flexibilität der dünnen Schichten aus [40]. Die Herstellung der organischen Schichten erfolgt zudem meistens aus der Flüssigphase basierend auf Lösemitteln und ist aufgrund der Anwendbarkeit von einfachen Beschichtungs- und Druckverfahren kostengünstig. Mit organischen Tandem-Solarzellen konnten bisher Wirkungsgrade von bis zu 17.3% erzielt werden [41]. Auf Basis des in dieser Arbeit verwendeten Modellsystems PTB7-Th:PC₇₁BM wurde mit einer konventionellen Architektur ein Wirkungsgrad von 10.3% für eine Einfach-Solarzelle erreicht [42]. Dabei werden der Donator Poly[4,8-bis(5-(2-ethylhexyl)thiophen-2-yl)benzo[1,2-b;4,5-b']dithiophene-2,6-diyl-alt-(4-(2-ethylhexyl)-3-fluorothieno[3,4-b]thiophene)-2-carboxylate-2,6-diyl] (PTB7-Th) und der Akzeptor PC₇₁BM verwendet und bilden als Mischsystem den Absorber. Die chemischen Strukturformeln beider organischen Verbindungen sind in Abbildung 2.4 aufgeführt. Die Bandlücke von PTB7-Th und PC₇₁BM liegt jeweils bei 1.58 eV und 1.8 eV [43].

Die Lichtabsorption in organischen Absorbieren ist ähnlich hoch wie bei Perowskiten. Denn die organischen Mischsysteme zeichnen sich in der Regel durch hohe Absorptionskoeffizienten aus [43, 44]. Daher kann bereits in dünnen organischen Schichten, deren Schichtdicke durch die geringe Mobilität freier Ladungsträger limitiert ist, relativ viel Licht absorbiert werden und zur Energiegewinnung beitragen. Der Nachteil von organischen Halbleitern liegt in der Degradation der Materialien, die im Vergleich zu Si deutlich stärker ist [45]. Organische Schichten können beispielsweise chemisch degradieren, indem Sauerstoff und Wasser in die Schichten diffundiert und dort chemische Verbindungen aufbricht. Ebenso unterliegen die organischen Verbindungen der lichtinduzierten Degradation, wobei unter Beleuchtung die chemischen Verbindungen durch energiereiche Photonen aufgebrochen werden. Mit organischen Solarzellen auf Basis von Akzeptor-Molekülen, die keine Fulleren-Struktur besitzen (engl. non-fullerene acceptors), erreichten Du *et al.* bemerkenswerte Ergebnisse hinsichtlich der Bauteil-Lebensdauer. Dabei wurde die Degradation von Solarzellen mit Wirkungsgraden von rund 8% untersucht. Eine Extrapolation der Ergebnisse ließ auf die Abnahme der Effizienz von 20% relativ nach 11000 h im Betrieb schließen [46].

2.2 Einfach-Solarzellen

Zum Verständnis der Wirkungsweise einer Solarzelle werden im Folgenden Aufbau, Banddiagramm und charakteristische Kenngrößen beschrieben. Solarzellen bestehen im Wesentlichen aus

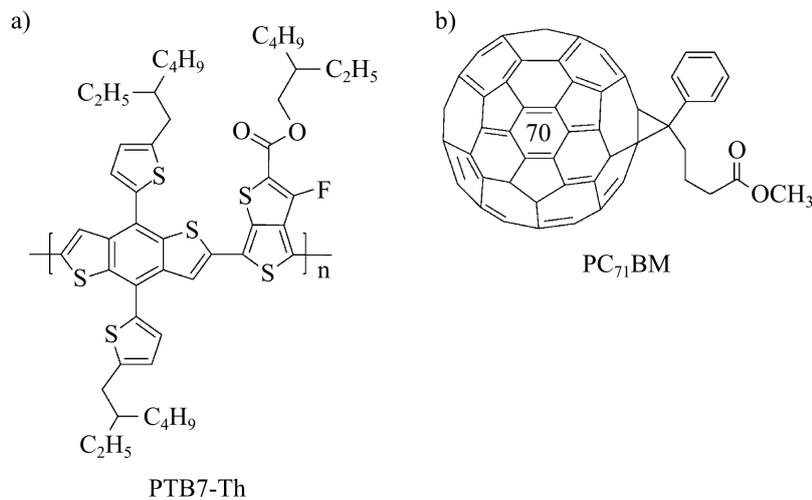


Abbildung 2.4: Chemische Strukturformeln a) des organischen Donator-Moleküls PTB7-Th und b) des organischen Akzeptor-Moleküls PC₇₁BM.

einem Absorber zur Erzeugung freier Ladungsträger, aus Kontakten an der Ober- und Unterseite zur Sammlung der erzeugten Ladungsträger und ferner aus einer Antireflexschicht (ARC, engl. anti-reflective coating) an der Oberseite zur erhöhten Lichteinkopplung. Das elektrische Feld im Absorber zur räumlichen Ladungsträgertrennung wird bei anorganischen Halbleitern durch Dotieren des Halbleiters und bei organischen Halbleitern durch die Differenz in der Austrittsarbeit der beiden Elektroden erzeugt. Das durch diese Maßnahmen erzeugte räumliche Ungleichgewicht im Halbleiter wird durch Diffusion der Elektronen ausgeglichen. Infolge dessen wird das elektrische Feld aufgebaut. Es werden weitere Transportschichten mit erhöhter Leitfähigkeit und ferner selektive Schichten, um die jeweilige Ladungsträgersorte an die Elektroden zu transportieren und die andere Ladungsträgersorte zur Vermeidung von Rekombination an den Grenzschichten zu blockieren.

Das klassische Beispiel für die räumliche Trennung und den Transport von erzeugten Ladungsträgern in anorganischen Halbleitern ist der p-n-Übergang. Das Banddiagramm eines p-n-Übergangs ist in Abbildung 2.5 schematisch dargestellt. Das Verbinden eines p-dotierten Bereichs und eines n-dotierten Bereichs mit unterschiedlichem Fermi-Niveau führt zum Anstieg bzw. Abfall der Bandkanten im Bereich des Übergangs und die Fermi-Niveaus gleichen sich an. Dabei diffundieren die durch Dotierung eingebrachten Ladungsträger infolge des Konzentrationsgefälles der Elektronen und bauen ein Gefälle im elektrischen Potential über die Raumladungszone hinweg auf. Das Energieniveau von Leitungsband- und Valenzbandkante ist nach der Elektronen-Diffusion nicht mehr konstant. Die Differenz des jeweiligen Energieniveaus im p- und im n-Bereich wird Diffusionsspannung U_D genannt (siehe Abbildung 2.5). Bei Beleuchtung des p-n-Übergangs werden Ladungsträger erzeugt, welche dann im Halbleiter zum einen über Drift im elektrischen Feld und zum anderen über Diffusion im Konzentrationsgefälle bewegt werden, entsprechend der Theorie des Drift-Diffusions-Modells. In einer Solarzelle sind an der Vorder- und Rückseite des p-n-Übergangs die Elektroden bzw. eine Kombination von Transportschichten und Kontaktfingern angebracht, um einen Großteil der im p-n-Übergang getrennten Ladungsträger zu sammeln.

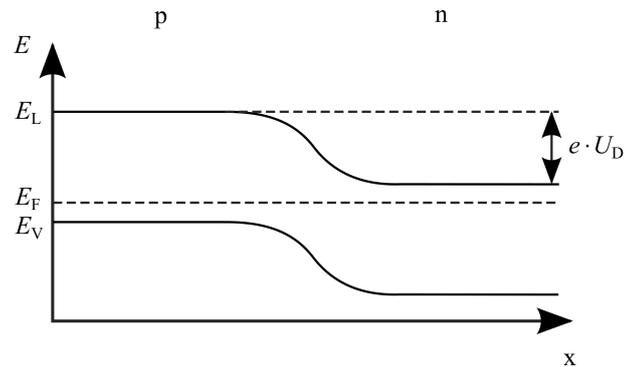


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung eines p-n-Übergangs. Bei Kontakt eines p-dotierten und eines n-dotierten Halbleiters diffundieren Elektronen der Dotier-Atome vom n-dotierten in den p-dotierten Bereich. Das resultierende elektrische Potential führt zu einem Gefälle im Leitungs- und Valenzband im Bereich des Übergangs. Im thermodynamischen Gleichgewicht ist das Niveau von E_F konstant und es stellt sich die Diffusionsspannung U_D an der Raumladungszone ein.

In organischen Halbleitern ist bei der Photon-Absorption das erzeugte Elektron-Loch-Paar zunächst stark gebunden und bildet ein Exziton. Zur Trennung der Ladungsträger muss das Exziton aufgespalten werden. Die Ladungsträgertrennung erfolgt dabei in einer Bulk-Heterojunction (BHJ), bei der Donator- und Akzeptor-Moleküle vermischt werden und sich Domänen ausbilden. In Abbildung 2.6a ist das Schema einer BHJ-Solarzelle dargestellt. Im Idealfall sind die Donator- und Akzeptor-Moleküle derart vermischt, dass die entstehenden Domänen möglichst klein sind, aber sich keine Inseln bilden und möglichst jede Domäne Kontakt zu der zugehörigen Elektrode hat. Kleine Domänen sind für die Vermeidung der Rekombination von Exzitonen nötig, damit diese durch Diffusion an eine Donator-Akzeptor-Grenzfläche gelangen können. Donator- und Akzeptor-Moleküle haben unterschiedliche HOMO- bzw. LUMO-Niveaus. Bei Akzeptor-Molekülen liegen beide Niveaus jeweils bei einer niedrigeren Energie als bei den Donator-Molekülen. Die relative Lage der Energieniveaus ist in Abbildung 2.6b veranschaulicht. Nach der Diffusion eines Exzitons an die Domänen-Grenzfläche geht es zunächst in einen CT-Zustand (engl. charge-transfer) über, indem ein Ladungsträger aufgrund der besseren Energiebilanz in die andere Domäne übergeht. Wenn das Exziton dann dissoziiert, werden die Ladungsträger im elektrischen Feld voneinander getrennt. Anschließend driften die Elektronen in den Akzeptor-Domänen sowie die Löcher in den Donator-Domänen zu den elektrischen Kontakten, um dort aufgesammelt zu werden.

Wichtige Kenngrößen zur Charakterisierung einer Solarzelle werden über die Messung der Stromdichte-Spannungs-Kennlinie (J - U -Kennlinie) bestimmt. Die J - U -Kennlinie einer Solarzelle unter Beleuchtung ist in Abbildung 2.7 gezeigt. Diese gleicht im Wesentlichen der J - U -Kennlinie ohne Beleuchtung und ist um die Photostromdichte verschoben. In der Darstellung ist nur der für die Stromerzeugung aus der Solarzelle relevante Bereich der J - U -Kennlinie gezeigt. In einer Solarzelle unter Beleuchtung ohne äußere angelegte Spannung U stellt sich die Kurzschlussstromdichte (J_{SC} , engl. short-circuit current density) ein. Bei Anlegen der Leerlaufspannung (U_{OC} , engl. open-circuit voltage) hebt die Spannung im Wesentlichen U_D auf und es fließt kein Strom aus oder in das Bauteil. Die photo-generierten Ladungsträger rekombinieren entsprechend im Halbleiter.

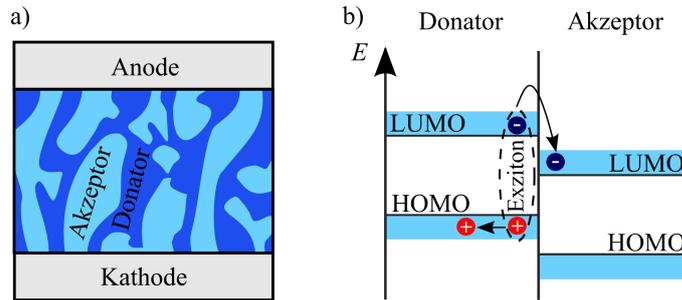


Abbildung 2.6: a) Vereinfachte Darstellung des Absorbers und der Elektroden in einer organischen Solarzelle. Der Absorber besteht aus dem Mischsystem von Donator und Akzeptor. b) Energetische Lage der HOMO- und LUMO-Niveaus in einem Donator und einem Akzeptor. Der Übergang des Elektrons aus einem Exziton im Donator auf den Akzeptor bei der Ladungsträger-trennung ist angedeutet.

Für die optimale Energieausbeute wird die Solarzelle am Arbeitspunkt der maximalen Leistung betrieben. Die angelegte Spannung und die resultierende Stromdichte am Bauteil werden mit U_{MPP} (MPP, engl. maximum power point) und J_{MPP} bezeichnet. P_{el} wird aus dem Produkt

$$P_{\text{el}} = U_{\text{MPP}} \cdot J_{\text{MPP}} \quad (2.1)$$

berechnet und ist in Abbildung 2.7 durch die grün schraffierte Fläche gekennzeichnet. Der Wirkungsgrad η einer Solarzelle ist definiert als

$$\eta = \frac{P_{\text{el}}}{P_{\text{Licht}}} \quad (2.2)$$

mit der Leistungsdichte P_{Licht} des eingestrahlenen Lichts. Für P_{Licht} wird in der Regel das integrierte AM1.5g Spektrum (engl. air-mass 1.5 global) entsprechend den Standardtestbedingungen (STC, engl. standard test conditions) [47] verwendet. Die Qualität einer Solarzelle wird durch den Füllfaktor FF beschrieben. Dieser ist definiert als

$$\text{FF} = \frac{U_{\text{MPP}} \cdot J_{\text{MPP}}}{U_{\text{OC}} \cdot J_{\text{SC}}} \quad (2.3)$$

und gibt in Abbildung 2.7 das Verhältnis der grün schraffierten Fläche unter MPP und der Fläche definiert über das Produkt $U_{\text{OC}} \cdot J_{\text{SC}}$ an. Der Wirkungsgrad lässt sich somit direkt aus dem FF über

$$\eta = \frac{\text{FF} \cdot U_{\text{OC}} \cdot J_{\text{SC}}}{P_{\text{Licht}}} \quad (2.4)$$

berechnen.

2.2.1 Perowskit-Solarzellen

Seit den ersten Errungenschaften in der Herstellung von Perowskit-Solarzellen im Labor [48, 49] haben sich Perowskite in den letzten Jahren rasant entwickelt. Der Weltrekord von Perowskit-Solarzellen liegt derzeit bei 25.2% [5]. Zum Vergleich, der Weltrekord von Si-Solarzellen (ohne

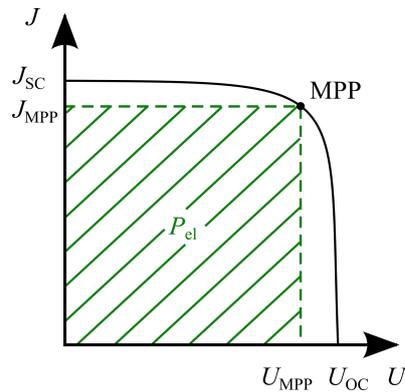


Abbildung 2.7: Schematische Darstellung einer J - U -Kennlinie im Bereich von 0 V bis U_{OC} . Die elektrische Leistungsdichte P_{el} ist das Produkt aus U_{MPP} und J_{MPP} . Am MPP ist das Produkt aus Spannung und Stromdichte maximal. Die generierte P_{el} entspricht der grün schraffierten Fläche.

Konzentration) liegt bei 26.7% [3]. Die hohe Lichtabsorption aufgrund der direkten Bandlücke im Perowskit ermöglicht effiziente Absorber mit Schichtdicken im Bereich von nur wenigen 100 nm. Der geringe Materialverbrauch sowie niedrige Kosten in der Herstellung machen Perowskit-Solarzellen attraktiv für den Markt in der Photovoltaik. Neben dem aufwändigen Verfahren über physikalische Gasphasenabscheidung werden Perowskite meist nass-chemisch mittels Rotationsbeschichtung (engl. spin coating) oder ferner mittels Schlitzdüsen-Beschichtung (engl. slot-die coating) sowie neuerdings mittels Tintenstrahldrucker (engl. ink-jet printing) [50] hergestellt. Bei der Schichterstellung aus der Flüssigphase kann auf aufwändige Verfahren im Vakuum verzichtet werden. Weiter ist die Beschaffung der Ausgangsstoffe für Perowskite sehr günstig und es fällt keine Wafer-Produktion wie bei c-Si oder poly-Si an. Das Abscheiden mittels ink-jet printing befindet sich noch im Forschungsstadium und zeichnet sich durch schnelle, sparsame und großflächige Prozesse aus.

Perowskit-Solarzellen bestehen aus einer Abfolge planarer funktioneller Schichten. Ein weitverbreiteter Aufbau ist in Abbildung 2.8 dargestellt. Auf einem Glassubstrat befindet sich in der genannten Reihenfolge eine transparente Elektrode aus Indiumzinnoxid (ITO, engl. indium tin oxide), eine Elektron-Transportschicht oftmals aus Titandioxid (TiO_2), der Absorber Perowskit, eine Loch-Transportschicht aus beispielsweise 2, 2', 7, 7'-tetrakis-(N,N -di-4-methoxyphenylamino)-9, 9'-spirobifluorene (Spiro-MeOTAD) oder Nickeloxid (NiO) und eine rückseitige Elektrode oftmals aus Gold (Au). Für die Verwendung in Tandem-Solarzellen wird eine semitransparente Solarzelle mit einer rückseitigen Elektrode aus ITO verwendet.

Die Dicke der Perowskitschicht liegt im Bereich von wenigen 100 nm und ist kleiner als die Diffusionslänge freier Ladungsträger im Perowskit [23]. Dies ermöglicht eine hohe Sammlungseffizienz der Ladungsträger in den Kontakten. Die Schichtdicke von Spiro-MeOTAD ist etwa 200 nm und die übrigen Schichten sind wenige bis einige 10 nm dick. Der Schichtstapel hat aufgrund der kleinen Schichtdicken im Bereich der Wellenlänge von Licht Auswirkungen auf die Lichtausbreitung in Form von Interferenzen. Lichtmanagement durch Optimieren der Schichtdicken kann sich hierbei günstig auf die Absorption und den Wirkungsgrad auswirken. Wichtig für die Reduzierung von Reflexionsverlusten bei der Lichteinkopplung ist zudem die Wahl der Materialien hinsichtlich des Brechungsindex. Dabei steigt der Brechungsindex von den oberen Schichten einer Solarzelle

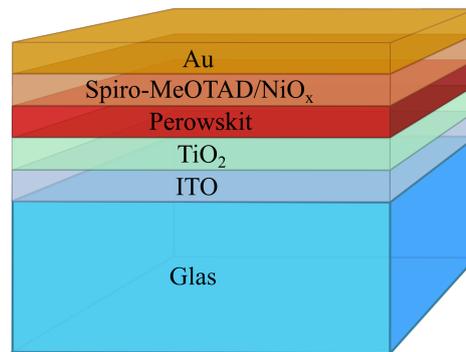


Abbildung 2.8: Typischer Aufbau einer Perowskit-Solarzelle. Die Dicke der Schichten in einer Perowskit-Solarzelle liegt im Bereich von 10 nm bis 100 nm. Das Glassubstrat ist ca. 3 mm dick.

hin zu den unteren Schichten, wobei Sprünge im Brechungsindex so gering wie möglich gehalten werden.

2.2.2 Silizium-Solarzellen

Die Si-Technologie in der Photovoltaik ist weit ausgereift. Hauptsächlich werden Solarzellen mit Si-Absorber auf Basis von poly-Si und c-Si produziert. Im Folgenden werden Herstellung, Aufbau und Texturen als Methode des Lichtmanagements von Solarzellen basierend auf c-Si beschrieben, welche zugleich die leistungsfähigsten und damit vielversprechendsten für die Anwendung in Perowskit/Si Tandem-Solarzellen sind. Das Ausgangsmaterial in der Herstellung bildet ein über das Czochralski-Verfahren erzeugter n-dotierter c-Si Wafer. Der Schichtaufbau ist in Abbildung 2.9a dargestellt. An der Vorder- und Rückseite des Wafers wird ein Heteroübergang durch beidseitiges Aufbringen von intrinsischem a-Si (a-Si(i)) erzeugt. Mit den Schichten wird zudem die Oberfläche des c-Si durch Sättigung der frei liegenden Si-Atome passiviert. Der pn-Übergang wird hervorgerufen durch eine weitere Schicht an der Vorderseite bestehend aus p-dotiertem a-Si (a-Si(p)), sowie durch eine Schicht an der Rückseite aus n-dotiertem a-Si (a-Si(n)). Die Solarzelle wird entsprechend ihrer Struktur HIT-Solarzelle genannt [51]. In dieser Solarzelle werden an beiden Seiten transparente Elektroden aus einem TCO (engl. transparent conductive oxide) in Kombination mit metallischen Kontaktfingern eingesetzt.

Mit einer auf den ersten Blick ungewöhnlichen Modifikation des Aufbaus wurde der Wirkungsgrad einer HIT-Solarzelle durch Yoshikawa *et al.* weiter gesteigert. Die Modifikation besteht im Austausch der rückseitigen Schicht a-Si(n) durch eine alternierende Abfolge von Streifen aus a-Si(n) und a-Si(p) und im Verzicht auf die Schicht a-Si(p) an der Vorderseite (siehe Abbildung 2.9b). Die Rückelektroden für beide Kontakte werden entsprechend an der Rückseite angebracht. Diese Struktur wird als IBC-Solarzelle bezeichnet [3].

Eine etablierte Methode zur Verbesserung des Lichtmanagements ist die Strukturierung des Si an der Vorder- und Rückseite des Wafers. An der Vorderseite wird hierbei die Lichteinkopplung durch Mehrfachreflexion des einfallenden Lichts gesteigert. Die Textur wird durch nass-chemisches Ätzen an der Oberfläche des Wafers erzielt. Dabei werden an der Oberfläche des Si-Einkristalls Pyramiden mit einer Strukturgröße im Bereich von wenigen Mikrometern erzeugt. Eine Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme von der texturierten c-Si Oberfläche ist in Abbildung 2.10 gezeigt. Die üblich verwendete Orientierung des Kristalls ist dabei (100), wodurch aufrecht

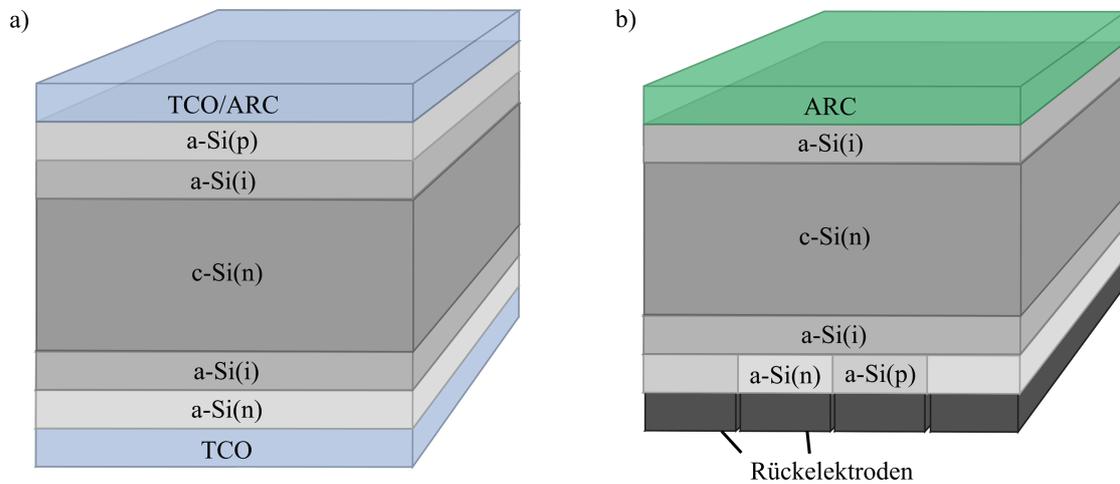


Abbildung 2.9: Schematischer Aufbau einer a) HIT-Solarzelle (engl. heterojunction with intrinsic thin layer) und einer b) IBC-Solarzelle (engl. interdigitated back contact). Die typische Schichtdicke für c-Si liegt im Bereich von $100\ \mu\text{m}$ und für die Schichten aus a-Si im Bereich von $10\ \text{nm}$. Bei der HIT-Solarzelle sind zusätzlich Elektroden in Form von Kontaktfingern auf der Vorder- und Rückseite aufgebracht. Das TCO an der Vorderseite übernimmt hier zusätzlich die Funktion eines ARC.

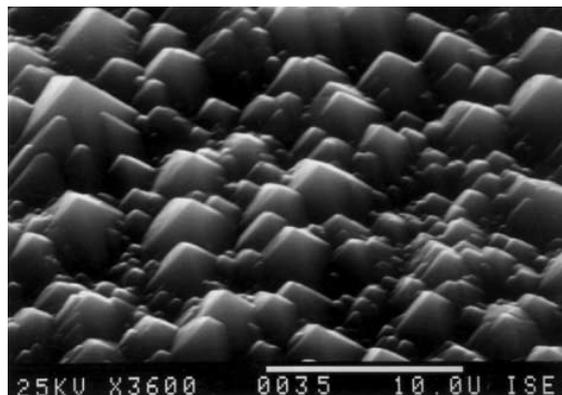


Abbildung 2.10: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme von texturiertem c-Si. Die Pyramiden haben eine Größe von wenigen Mikrometern und sind zufällig auf der Oberfläche verteilt. Entnommen aus [52]. Reprinted with permission from Sol. Energy Mater. Sol. Cells 2001, 70, 103-113. Copyright Elsevier.

stehende Pyramiden durch das Ätzen entstehen [52]. In der vorliegenden Arbeit wird zudem der Einfluss weiterer Texturen untersucht. Neben aufrecht stehenden Pyramiden mit zufälliger Verteilung (engl. random upright) werden auch aufrecht stehende Pyramiden mit periodischer Anordnung (engl. regular upright) sowie invertierte Pyramiden mit periodischer Anordnung (engl. regular inverted) untersucht. Es wird jedoch nur ein sehr geringer Einfluss der verschiedenen Texturen auf die für diese Arbeit relevanten Größen wie den EY von Solarzellen festgestellt.

Durch die Textur an der Vorderseite wird zudem der effektive Lichtweg der eingekoppelten Teilstrahlen im Absorber verlängert. Denn das einfallende Licht tritt aufgrund der Lichtbrechung an der pyramidalen Struktur unter einem flacheren Winkel in das Si ein. Die Strukturierung des Wafers an der Rückseite hat einen ähnlichen Effekt auf rückseitig reflektiertes Licht und verlängert ebenfalls durch Streuung den effektiven Lichtweg. Man spricht von Einfangen des Lichts (Light-Trapping). Dadurch werden optische Verluste durch Reflexion und Transmission reduziert und die Absorption gesteigert [53]. HIT-Solarzellen erreichen mit beidseitiger Textur einen Wirkungsgrad von 24.7% [51]. IBC-Solarzellen erreichen trotz einseitiger Textur an der Vorderseite einen Wirkungsgrad von 26.3%. Hierbei werden u.a. optische Verluste durch den Wegfall von Elektroden an der Vorderseite reduziert.

2.2.3 Organische Solarzellen

Ein Vorteil der organischen Solarzellen gegenüber Si sind die einfachen Depositionsmethoden, mit denen sich die Bauteile herstellen lassen. Der bisher erreichte maximale Wirkungsgrad von 17.3% [41] liegt allerdings weit unter dem von Si-Solarzellen. Die kostengünstige Herstellung der organischen Solarzellen ist unter anderem darin begründet, dass bei dieser Technologie keine Hochtemperaturverfahren notwendig sind. Zur Herstellung von organischen Schichten können nass-chemische Beschichtungsverfahren wie spin coating und slot-die coating, sowie Druckverfahren wie Rolle-zu-Rolle-Verfahren (engl. roll-to-roll processing), ink-jet printing, Rakeln (engl. doctor blading) und Siebdruck (engl. screen printing) eingesetzt werden [16].

In Abbildung 2.11 ist der planare Schichtaufbau einer typischen organischen Solarzelle veranschaulicht. Das Donator-Akzeptor-System PTB7-Th:PC₇₁BM bildet den Absorber der Solarzelle. Die Domänenstruktur des Absorbers in einer BHJ wurde bereits in Abbildung 2.6a dargestellt. Die typische Schichtdicke von organischen Absorbern liegt im Bereich von wenigen 100 nm. Auf dem Glassubstrat mit einer Schichtdicke von ca. 1 mm befindet sich zunächst eine transparente ITO-Elektrode mit einer Schichtdicke von rund 70 nm. Auf der ITO-Elektrode wird das Donator-Akzeptor-System als Absorberschicht aufgebracht. Darauf folgt der Lochleiter MoO₃ mit einer sehr geringen Schichtdicke von etwa 5 nm. Der vorgestellte Schichtaufbau wird mit einer opaken 100 nm dicken Elektrode aus Ag abgeschlossen.

Die Schichten einer organischen Solarzelle sind näherungsweise planar und die gesamte Dicke der Solarzelle beträgt nur wenige 100 nm. In dieser Dünnschicht-Solarzelle gelangt unter Beleuchtung ein wesentlicher Anteil des Lichts bis an die Rückelektrode. Da das reflektierte Licht mit dem einfallenden Licht interferiert, werden die Schichtdicken des Bauteils in der Regel optimiert, um die Lichtabsorption durch konstruktive Interferenz zu maximieren. Auch durch Anbringen eines ARC am Glassubstrat wird durch Reduktion der Reflexionsverluste mehr Licht in die Solarzelle eingekoppelt. Im Rahmen dieser Arbeit wird zur weiteren Steigerung der Bauteileffizienz von organischen Einfach-Solarzellen das Potential eines Resonator-Aufbaus hinsichtlich winkelabhängiger Lichtabsorption untersucht. Der Resonator wird dabei im Wesentlichen durch die

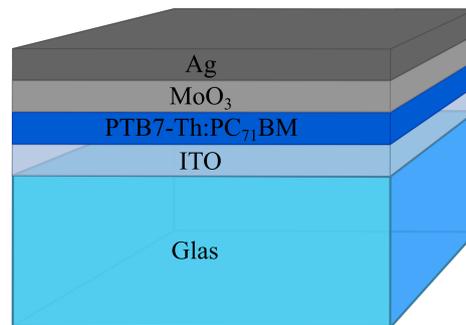


Abbildung 2.11: Darstellung des Schichtaufbaus einer organischen Solarzelle. Bis auf das Glassubstrat liegen alle Schichtdicken im Bereich von 5 nm bis 100 nm. Die Dicke des Glassubstrats liegt im Bereich von 1 mm.

Rückelektrode sowie eine dünne metallische Frontelektrode gebildet, um das Light-Trapping durch Interferenzeffekte weiter zu verstärken.

2.3 Tandem-Solarzellen

Der Einsatz von Stapel-Solarzellen dient zur besseren Ausbeute des Sonnenlichts bei Verwendung derselben Fläche wie bei Einfach-Solarzellen. Der theoretische Wirkungsgrad von Stapel-Solarzellen ist höher als bei Einfach-Solarzellen und steigt mit der Anzahl der Absorber. Tandem-Solarzellen mit zwei Absorbern bilden die einfachste Form von Stapel-Solarzellen und bieten daher eine potentielle Möglichkeit der Erweiterung bestehender hochleistungsfähiger Einfach-Solarzellen. Dabei wird der Absorber mit der größeren Bandlücke auf die der Sonne zugewandten Seite angebracht. Abbildung 2.12 zeigt das Prinzip der Lichtabsorption unter einem AM1.5g Spektrum in einer Tandem-Struktur. Der höhere Wirkungsgrad wird erzielt durch Verringern der Thermalisierungsverluste bei der Absorption von Photonen im Halbleiter. Durch die Absorption der hochenergetischen Photonen in einer Solarzelle mit größerer Bandlücke kann elektrische Energie über eine größere elektrische Spannung abgegriffen werden. Die sonst überschüssige Energie eines Photons E_{ph} versetzt das vom Valenzband angeregte Elektron in einen Zustand oberhalb der Leitungsbandkante, von dem aus das Elektron dann ungenutzte Energie bei der Relaxation zur Leitungsbandkante in Form von Wärme an das Kristallgitter abgibt.

Die erzeugten Ladungsträger werden über die elektrischen Kontakte der Solarzellen gesammelt. Die beiden verbreitetsten Verschaltungen von Tandem-Solarzellen sind die monolithische serielle Verschaltung mit zwei Elektroden (2T) und die parallele Verschaltung mit vier Elektroden (4T). Ferner ist eine Verschaltung mit drei Elektroden (3T, engl. three-terminal) möglich. Die monolithische Verschaltung wird durch Kristallwachstum realisiert, bei der die einzelnen Schichten der oberen Solarzelle epitaktisch auf der darunter liegenden Schicht wachsen. Beispiele für Tandem-Solarzellen sind Solarzellen auf Basis des Elementhalbleiters Si, wie Perowskit/Si Tandem-Solarzellen, und auf Basis des III-V-Verbindungshalbleiters GaAs, wie beispielsweise GaInP/GaAs Tandem-Solarzellen. Derzeit wird an der Kommerzialisierung von Perowskit/Si Tandem-Solarzellen gearbeitet mit dem Ziel der Serienfertigung. Den momentanen Weltrekord mit einem Wirkungsgrad von 29.15% und monolithischer Verschaltung der Tandem-Solarzelle hält das Helmholtz-Zentrum Berlin [54].

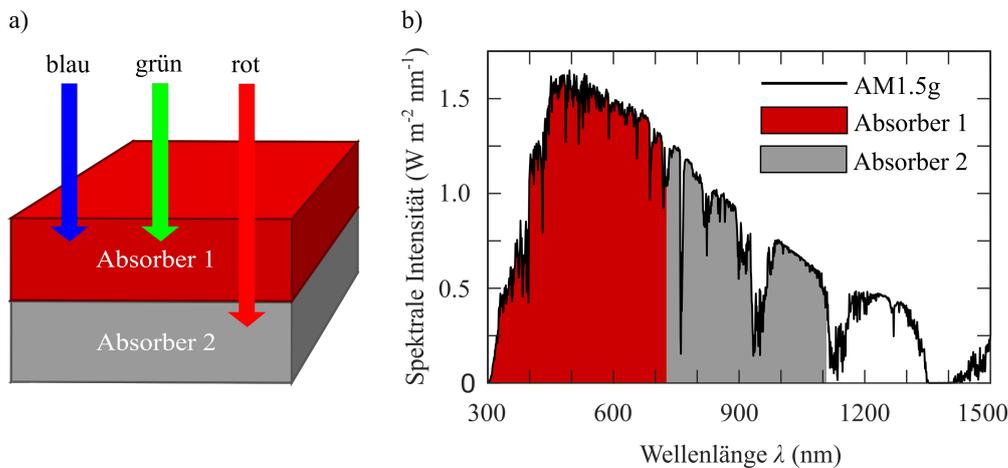


Abbildung 2.12: a) Prinzip einer Tandem-Solarzelle bestehend aus einem Absorber 1 mit großer Bandlücke und einem Absorber 2 mit kleiner Bandlücke. b) Beispiel für die spektrale Lichtabsorption in einer Tandem-Solarzelle unter einem AM1.5g Spektrum. In Absorber 1 wird der energiereiche Spektralbereich bis zur E_G des Absorbers 1 (beispielsweise Blau und Grün) absorbiert und in Absorber 2 der Spektralbereich bis zur E_G des Absorbers 2 (beispielsweise Rot und Infrarot). Der energieärmere Teil des Spektrums kann nicht absorbiert werden.

2.3.1 Perowskit-Silizium-Solarzellen

Die Kombination von Perowskiten mit der bestehenden Si-Technologie hat ein großes Potential für leistungsfähige Solarzellen und eine effiziente Energiekonversion. Bei der Kombination von Perowskit und Si kann die Aufnahme der Energie unter nahezu optimalen Bedingungen erfolgen. Durch Anpassen der Stoffzusammensetzung im Perowskit lässt sich die Bandlückenenergie E_G maßschneidern. Dabei kann E_G des Perowskits prinzipiell so an Si angepasst werden, dass die Energie und die Anzahl der absorbierten energiereichen Photonen im Perowskit in einem möglichst optimalen Verhältnis zu den absorbierten Photonen im Si stehen. Schon die nahezu ideale Bandlücke von Perowskiten für die Kombination mit Si macht Perowskit zu dem attraktivsten Halbleitermaterial für Tandem-Solarzellen auf Basis von Si [55]. Im Vergleich zum theoretischen Limit für Si-Solarzellen von 29% [4] kann der Wirkungsgrad mit Perowskit/Si Tandem-Solarzellen auf weit über 35% gesteigert werden [31].

Die Produktion von Si-Solarzellen ist Bestandteil einer ausgereiften Technologie. Die Kosten der Herstellung von c-Si Modulen sind in den letzten Jahrzehnten stark gesunken und lagen im Jahr 2018 bei etwa 0,37 US\$ pro W. Neben den Kosten für c-Si, für die Paste zur Metallisierung und für Zusammenbau und Fabrikation sind vor allem die Kosten für das Verarbeiten des Wafers gesunken [56]. Die Verfahren zur Herstellung von Perowskit-Solarzellen sind mit den Herstellungsprozessen von Si-Solarzellen vereinbar. Bei der Abscheidung der Schichten einer Perowskit-Solarzelle auf einer Si-Solarzelle bleibt die hohe Qualität der Si-Solarzelle erhalten und die einzelnen Schichten werden nicht angegriffen. Eine vorteilhafte Strategie ist demnach, bei der Herstellung von Perowskit/Si Tandem-Solarzellen auf die schon optimierten Prozesse in der Produktion von Si-Solarzellen zurückzugreifen.

Eine Möglichkeit, die schwache Absorption des infraroten Lichtanteils im c-Si zu verbessern, ist das Übertragen des Light-Trapping-Konzepts von Si-Solarzellen auf Perowskit/Si Tandem-

Solarzellen. Die naheliegende Methode ist das direkte Einbringen von pyramidenförmigen Texturen in die Architektur von Perowskit/Si Tandem-Solarzellen. Da die Depositionsmethode des Perowskits von der Architektur abhängt, macht eine Kosten-Nutzen-Abwägung aller grundsätzlich möglichen Architekturen Sinn. Prinzipiell kommen Architekturen mit c-Si-Texturen an der Vorderseite, an der Rückseite und an beiden Seiten infrage. Im Fall einer flachen Vorderseite des c-Si können auch Strukturierungen an der Vorderseite der Perowskit-Solarzelle eingebracht werden. Eine flache Vorderseite ermöglicht kostengünstige Verfahren wie spin coating oder slot-die coating zur Herstellung der Perowskit-Solarzelle direkt auf der Si-Solarzelle. Eine Strukturierung an der Vorderseite vereint auf diese Weise geringe Herstellungskosten und hohe Effizienz durch gesteigerte Lichteinkopplung. Die Strukturierung lässt sich z.B. mit transparenten Folien realisieren, in die Nanostrukturierungen eingearbeitet werden können und die auf der Vorderseite der Solarzelle aufgebracht werden. Auf diese Weise wurden Perowskit/Si Tandem-Solarzellen durch Jost *et al.* [57] mittels Folien verbessert, in die zuvor eine pyramidenförmige c-Si-Textur eingepreßt wurde. Texturen an der Vorderseite reduzieren zudem erheblich optische Verluste durch Reflexion. Dies ist auch der Fall für schräg einfallendes Licht und damit verbessern Texturen die Lichteinkopplung für beliebige Einfallswinkel, insbesondere auch für flache Winkel. Dies macht Perowskit/Si Tandem-Solarzellen weiter interessant für bauwerksintegrierte Photovoltaik (BIPV). Neben schrägen Dächern und Gebäudefassaden gibt es Flächen mit beliebigen Neigungswinkeln, die mit Modulen ausgestattet werden können, und Perowskit/Si Tandem-Solarzellen mit Texturen an der Vorderseite eignen sich besonders für BIPV.

In einer Perowskit/Si Tandem-Solarzelle befindet sich die Perowskit-Solarzelle auf der Oberseite einer Si-Solarzelle. Bei der Herstellung von Solarzellen mit monolithischer 2T-Verschaltung werden die Schichten der Perowskit-Solarzelle sequentiell direkt auf die Si-Solarzelle aufgebracht. Der Aufbau der Perowskit-Solarzelle ist invertiert (p-i-n). Bei Perowskit/Si Tandem-Solarmodulen wird auf der Perowskit-Solarzelle zusätzlich Ethylen-Vinylacetat (EVA) mit einer Dicke im Bereich von 100 μm zur Verkapselung und ein Glas mit einer Dicke von beispielsweise 3 mm aufgebracht. Zur Reduzierung der Reflexionsverluste am Übergang von Luft nach Glas wird ein ARC z.B. aus Magnesiumdifluorid (MgF_2) mit einer Dicke im Bereich von 100 nm auf das Glas aufgebracht. Der schematische Aufbau eines Perowskit/Si 2T Tandem-Solarmoduls ist in Abbildung 2.13 skizziert. Das TCO zwischen der Si- und Perowskit-Solarzelle bildet die Rekombinationsschicht.

Bei der Herstellung eines Perowskit/Si Tandem-Solarmoduls mit 4T-Verschaltung ist eine monolithische Bauweise nicht erforderlich und die Perowskit-Solarzelle wird in der Regel auf die Si-Solarzelle gestapelt. Für den mechanischen Kontakt und gegebenenfalls zum Ausgleich von Oberflächenrauheit wird dabei die Si-Solarzelle mit einer optisch transparenten Schicht bedeckt, bevor die Perowskit-Solarzelle aufgebracht wird. Diese Schicht sorgt weiter zur Verkapselung der einzelnen Solarzellen. Der Aufbau ist im Wesentlichen ähnlich zu dem eines 2T Solarmoduls, wobei an die Stelle der Rekombinationsschicht eine Verkapselung tritt und jede Solarzelle mit einem separaten Kontakt bestehend aus ITO oder einem vergleichbaren TCO versehen wird. Im Fall einer 4T-Verschaltung können Struktur-Profile zur verbesserten Lichteinkopplung an der Oberseite der Si-Solarzelle nicht auf die Perowskit-Solarzelle übertragen werden. Bei der monolithischen 2T-Verschaltung ist das möglich, wenngleich das Abscheiden auf bestehende Nano- oder Mikrostrukturierungen mit erhöhtem Aufwand und Schwierigkeitsgrad verbunden ist. Die Lichtabsorption in einem Perowskit/Si Tandem-Solarmodul ist in Abbildung 2.14 veranschaulicht. Der für das Absorptionsspektrum zugrunde liegende Schichtaufbau ist der in Abbildung 2.13

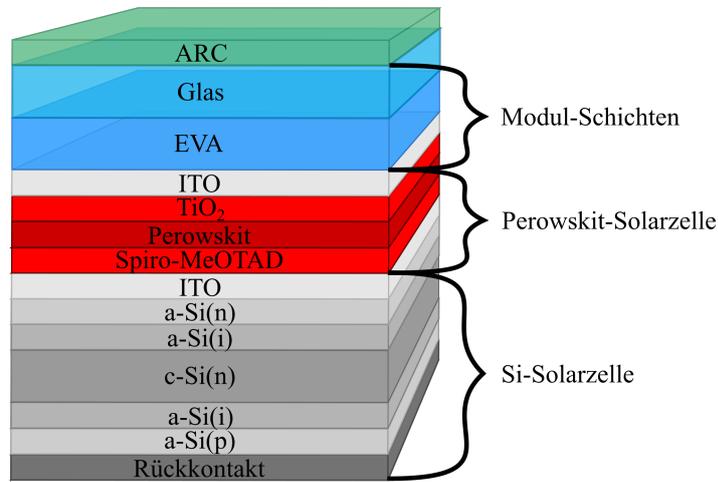


Abbildung 2.13: Schematischer Aufbau eines Perowskit/Si Tandem-Solarmoduls mit monolithischer 2T-Verschaltung. Der Aufbau beider Solarzellen ist invertiert (p-i-n) und die Perowskit-Solarzelle wird auf die Oberseite der Si-Solarzelle aufgebracht. Oberhalb der Modul-Schichten ist ein ARC angebracht zur Reduzierung von Reflexionsverlusten.

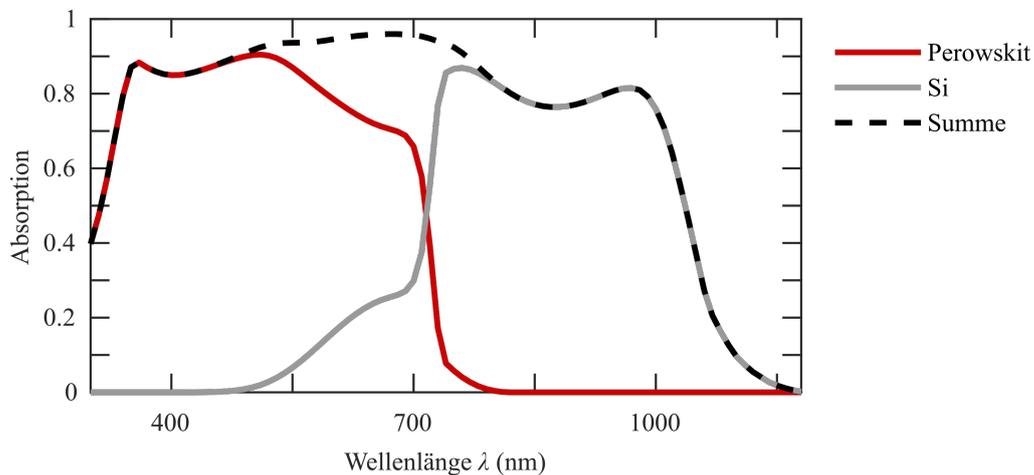


Abbildung 2.14: Absorptionsspektrum eines Perowskit/Si Tandem-Solarmoduls mit planarem Schichtstapel. Hierbei ist die Absorption im Perowskit (rot), im Si (grau) und die Summe der Absorption (schwarz gestrichelt) aufgetragen. Die Absorption in Perowskit und Si ist unvollständig aufgrund der optischen Verluste durch parasitäre Absorption und Reflexion.

zuvor dargestellte planare Schichtstapel. Die Absorption im Perowskit, im Si sowie deren Summe ist für senkrechten Lichteinfall an der Vorderseite des Tandem-Solarmoduls dargestellt. Die Absorption im Perowskit (Bandlücke 1.72 eV) endet bei einer Wellenlänge von etwa 750 nm. Die Absorption im Si (Bandlücke 1.1 eV) endet hingegen bei einer Wellenlänge von etwa 1150 nm. Aufgrund des planaren Schichtstapels liegt die Summe der Absorption im Perowskit und Si im Bereich von etwa 80-95% und nicht höher. Durch die bereits angesprochenen Konzepte des Lichtmanagements können Reflexionsverluste vermindert werden und die Absorption weiter erhöht werden. Die optischen Verluste aufgrund unvollständiger Absorption des langwelligen Lichts sind an der schwach ausgeprägten Absorption jeweils im Bereich der Bandkanten von Perowskit und Si zu erkennen. Aufgrund des geringen effektiven Lichtwegs im planaren Schichtstapel weist die Perowskit-Solarzelle zusätzlich zur Transmission im infraroten Spektralbereich einen Anteil an transmittiertem Licht im optischen Spektralbereich (500-750 nm) auf. Dieser transmittierte Anteil wird im Si absorbiert und geht daher nicht verloren. Ein Teil des infraroten Lichts (1000-1150 nm) jedoch wird am Rückkontakt reflektiert und verlässt das Tandem-Solarmodul an der Vorderseite ohne im Si absorbiert zu werden.

2.3.2 Elektrische Verschaltung

In der vorliegenden Arbeit werden Perowskit/Si Tandem-Solarzellen mit den Verschaltungen 2T und 4T hinsichtlich des EY beurteilt. Perowskit/Si Tandem-Solarzellen mit 3T-Verschaltung sind weniger verbreitet und werden im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht. Bei der Verschaltung mit zwei Kontakten wird die minimale Anzahl elektrischer Kontakte benötigt und optische Verluste durch parasitäre Absorption können auf ein Minimum reduziert werden. In diesem Fall sind die Subzellen elektrisch seriell verschaltet. Der Strom in einer Tandem-Solarzelle mit 2T-Verschaltung wird limitiert, wenn bei der Lichtabsorption in beiden Absorbern eine ungleiche Anzahl an Ladungsträgern generiert wird und somit der Photostrom in einer Subzelle geringer ist als in der anderen. In diesem Fall weicht die produzierte elektrische Leistung der Tandem-Solarzelle von ihrer maximal möglichen Leistung ab. Im Fall Currentmatching erzeugen beide Subzellen denselben Strom und die Tandem-Solarzelle liefert ihre maximal mögliche Leistung. Das Anpassen des Schichtstapels hinsichtlich Currentmatching ist in Tandem-Solarzellen mit 2T-Verschaltung notwendig für optimale Wirkungsgrade. Das kann bei Perowskit/Si 2T Tandem-Solarzellen durch Anpassen der Perowskit-Schichtdicke sowie durch Anpassen der Bandlücke des Perowskits erfolgen.

Bei Tandem-Solarzellen mit der Verschaltung 4T besitzt jede Subzelle zwei separate Kontakte. Dabei können die Subzellen unabhängig voneinander oder beispielsweise parallel betrieben werden. Für maximale Leistung muss die Bandlücke des Perowskits an die Bandlücke von Si angepasst werden. Das Anpassen der Schichtdicke jedoch entfällt, da die Tandem-Solarzelle auch maximale Leistung erzielen kann, wenn die Ströme in den Subzellen unterschiedlich sind (Currentmismatch).

Exemplarische J - U -Kennlinien für die Verschaltungen 2T und 4T sind in Abbildung 2.15 dargestellt. Aufgrund der seriellen Verschaltung resultiert die Spannung der 2T Tandem-Solarzelle aus der Addition der Spannungen beider Subzellen. Die Subzelle mit dem geringeren Strom bestimmt den Gesamtstrom der Tandem-Solarzelle. Für die 4T-Verschaltung entspricht die elektrische Gesamtleistung der Summe der elektrischen Leistungen beider Subzellen. Die Vorteile einer 2T-Verschaltung bestehen zum einen in der Minimierung optischer Verluste durch parasitäre

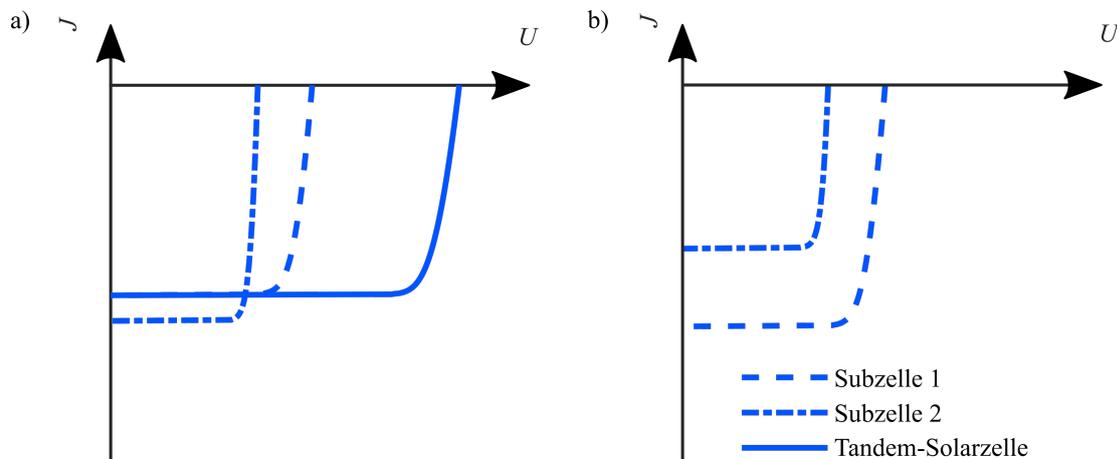


Abbildung 2.15: Schematische Darstellung der J - U -Kennlinien einer Tandem-Solarzelle. a) Bei der 2T-Verschaltung begrenzt die Subzelle mit dem geringeren Strom den Gesamtstrom in der Tandem-Solarzelle. Die Spannung der Tandem-Solarzelle ergibt sich aus der Summe der Spannungen beider Subzellen. b) Im allgemeinen Fall der 4T-Verschaltung werden die Subzellen unabhängig voneinander betrieben.

täre Absorption in den elektrischen Kontakten, da die gering möglichste Anzahl an Elektroden verwendet wird. Zum anderen ist nur ein Wechselrichter nötig, um den produzierten Strom der Tandem-Solarzelle in das Wechselstromnetz einzuspeisen. Der Vorteil einer 4T-Verschaltung hingegen liegt im unabhängigen Betrieb der Subzellen. Jede Subzelle arbeitet im eigenen MPP und das Anpassen der Tandem-Solarzelle hinsichtlich Currentmatching entfällt.

Die beiden in Kapitel 2.2.2 diskutierten Si-Solarzellen können für die 4T-Verschaltung von Perowskit/Si Tandem-Solarzellen verwendet werden [58]. Aufgrund der Anordnung der Elektroden ist die IBC-Solarzelle jedoch nicht für die 2T-Verschaltung von Perowskit/Si Tandem-Solarzellen geeignet, da beide Kontakte an der Rückseite angebracht sind. Daher ist die momentan leistungsfähigste bekannte Si-Solarzelle die HIT-Solarzelle, welche für die 2T-Verschaltung infrage kommt.

2.3.3 Kenngrößen und Energieertrag

Die Effizienz der in dieser Arbeit untersuchten Perowskit/Si Tandem-Solarzellen wird anhand verschiedener Kenngrößen beurteilt. Eine wichtige Kenngröße ist die Kurzschlussstromdichte J_{SC} . Hierüber können die optischen Verluste übergreifend beurteilt werden, da J_{SC} proportional zur Anzahl der absorbierten Photonen ist. Die elektrischen Verluste im Bauteil entstehen beim anschließenden Ladungsträgertransport und aufgrund der elektrischen Verschaltung und sind nur in der Kenngröße Wirkungsgrad η sowie in dem EY der Solarzelle miteinbezogen. Eine detaillierte Beschreibung von J_{SC} sowie den weiteren Kenngrößen U_{OC} , J_{MPP} , U_{MPP} , FF und η für Einfach-Solarzellen ist in Kapitel 2.2 sowie in der Abbildung 2.7 zu finden.

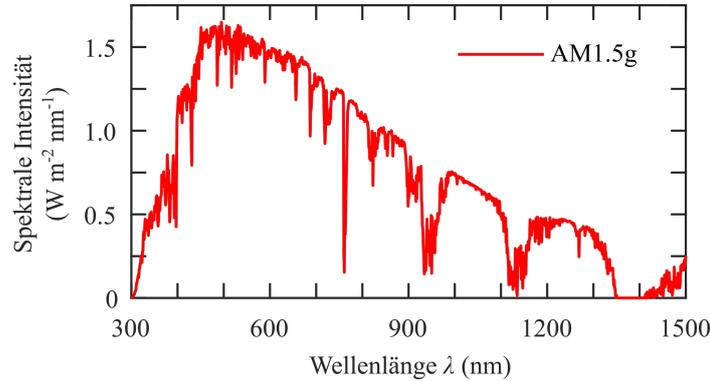


Abbildung 2.16: AM1.5g Spektrum der terrestrischen Sonneneinstrahlung [59]. Das Spektrum gilt als Standard für die Messung des Wirkungsgrads unter STC.

Die Kenngrößen einer Tandem-Solarzelle mit der Verschaltung 2T werden im Wesentlichen analog zu den Kenngrößen einer Einfach-Solarzelle definiert. Der Wirkungsgrad kann direkt aus der Kurzschlussstromdichte der limitierenden Subzelle J_{SC}^{\min} über

$$\eta^{2T} = \frac{FF^{\text{Tandem}} \cdot U_{OC}^{\text{Tandem}} \cdot J_{SC}^{\min}}{P_{\text{Licht}}} \quad (2.5)$$

berechnet werden. Die maximale P_{el}^{2T} am MPP zur Bestimmung des FF wird entsprechend über die J - U -Kennlinie der 2T Tandem-Solarzelle bestimmt.

Bei der 4T Verschaltung werden zunächst die Kenngrößen der elektrisch voneinander unabhängigen Subzellen separat bestimmt. Die P_{el} ergibt sich dann aus der Summe

$$P_{el}^{4T} = P_{el}^{\text{top}} + P_{el}^{\text{bot}} \quad (2.6)$$

der elektrischen Leistungsdichte P_{el}^{top} am MPP der Perowskit-Solarzelle und P_{el}^{bot} am MPP der Si-Solarzelle. Der Wirkungsgrad wird entsprechend über

$$\eta^{4T} = \frac{P_{el}^{4T}}{P_{\text{Licht}}} \quad (2.7)$$

berechnet.

Die Leistungsdichte des eingestrahnten Lichts P_{Licht} beträgt nach Norm der STC 1000 W m^{-2} [47]. Das zugehörige AM1.5g Spektrum ist in Abbildung 2.16 aufgeführt und referenziert. Die Messung des Wirkungsgrads erfolgt bei einer Temperatur der Solarzelle von $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Die Messung zur Bestimmung des Wirkungsgrads η von Solarzellen ist über STC exakt definiert, was eine vergleichbare Messung der Kenngröße verschiedener Solarzellen ermöglicht. Der entsprechende Messstand befindet sich in einem Raum mit künstlichen Bedingungen und die Messung erfolgt bei konstanter Beleuchtung unter senkrechtem Lichteinfall sowie bei konstanter Temperatur.

Ein realistischeres Maß zur Beurteilung von Solarzellen ergibt der über ein repräsentatives Zeitintervall integrierte EY [60, 61, 62]. Der EY berücksichtigt die Einstrahlung im Verlauf von einem Jahr auf Basis von meteorologischen Daten. In die Berechnung des EY geht die zeitliche Entwicklung der Einstrahlung ein. Darunter fallen die Änderung des Spektrums, des Einfallwinkels

und der Intensität der Einstrahlung. Anhand einer detaillierten Berechnung ermöglicht dieses Maß neben der Abschätzung des Ertrags beispielsweise die Beurteilung klimatischer Einflüsse sowie der Neigung des Moduls und von Modifikationen der Architektur. Weiter hat die Temperatur der Solarzelle einen Einfluss auf die Kenngrößen J_{SC} und U_{OC} und damit auf die elektrische Leistung. Die Temperatur der Solarzelle ändert sich mit der Intensität des eingestrahlten Lichts und ist unter realen Bedingungen eine dynamische Größe. Auf die Modelle zur Simulation des EY wird in Kapitel 3 genauer eingegangen.

2.4 Bifaziale Solarzellen

Der Ertrag von Solarmodulen kann gesteigert werden, indem am Boden reflektierte Strahlung zusätzlich über die Rückseite des Moduls eingefangen wird. Hierfür werden Solarzellen mit einem transparenten Rückkontakt eingesetzt [8]. Der Einsatz von bifazialen Solarzellen macht an denjenigen Aufstellorten Sinn, an denen Solarmodule mit Aufständerung installiert werden können. Mögliche Aufstellorte sind u.a. Gebäude- und Hausdächer, Freiflächenanlagen und Parkplätze. Bifaziale Solarzellen, die direkt auf der Auflage oder auf dem Untergrund aufliegen, liefern keinen zusätzlichen Ertrag, da die nutzbare Fläche in diesem Fall vollständig abgeschattet ist. Eine hohe Ausbeute wird erst ab einer bestimmten Befestigungshöhe des Moduls über dem Untergrund erzielt, indem die Abschattungsverluste verringert werden.

Der Ertrag von bifazialen Solarzellen hängt stark von dem Reflexionsgrad des Bodens ab. Die am Boden reflektierte Strahlung wird im Folgenden als Albedo-Strahlung bezeichnet. Dabei wird der Grad der Reflexion durch die Albedo des Bodens im Intervall zwischen 0 bis 1 beschrieben. So liefert beispielsweise der Beitrag von Albedo-Strahlung bei Gras mit einer durchschnittlichen Reflexion im optischen Bereich von etwa 35% eine wesentliche Steigerung der gesamten Einstrahlung.

Der Aufbau eines bifazialen Solarmoduls wird im Folgenden anhand einer Si-Solarzelle erläutert. In Abbildung 2.17 ist ein bifaziales Solarmodul auf Basis einer HIT-Solarzelle mit invertiertem Aufbau (p-i-n) dargestellt. Anstelle eines metallischen Rückkontakts wird wie an der Vorderseite ein transparenter Rückkontakt bestehend aus einem TCO eingesetzt. Der Strom wird ebenso an der Rückseite über dünne metallische Kontaktfinger abgeleitet. Die Kontaktfinger an der Vorder- und Rückseite sind nicht in der Abbildung aufgeführt. Darauf folgen analog zur Vorderseite die Schichten EVA und Glas sowie zur Reduzierung von Reflexionsverlusten ein ARC. Aufgrund des transparenten Rückkontakts treten bei einem bifazialen Si-Solarmodul geringe optische Verluste durch Transmission im Infrarot auf. Im Rahmen dieser Arbeit wird deutlich, dass diese Verluste bei Modulen mit gewöhnlichem Neigungswinkel allein schon durch rückseitige Lichteinkopplung von Strahlung aus Richtung der Hemisphäre des Himmels kompensiert werden.

Das Verständnis der Wirkungsweise von Lichtabsorption in bifazialen Tandem-Solarzellen ist komplexer als bei Einfach-Solarzellen. Dieses Wissen ist jedoch notwendig für das Design von bifazialen Solarzellen. Aufgrund der geringeren Bandlücke des Absorbers an der Unterseite wird rückseitig eingekoppeltes Licht nahezu ausschließlich im unteren Absorber absorbiert. Insbesondere hochenergetisches Licht im Bereich von Ultraviolett (UV) bis Rot wird aufgrund der starken Absorption und geringen Eindringtiefe absorbiert, bevor es den oberen Absorber mit der größeren Bandlücke erreicht. Der Schichtstapel einer bifazialen Tandem-Solarzelle mit 2T-Verschaltung muss dementsprechend hinsichtlich Currentmatching angepasst werden und entspricht nicht dem optimierten Schichtstapel einer monofazialen (opaken) Tandem-Solarzelle.

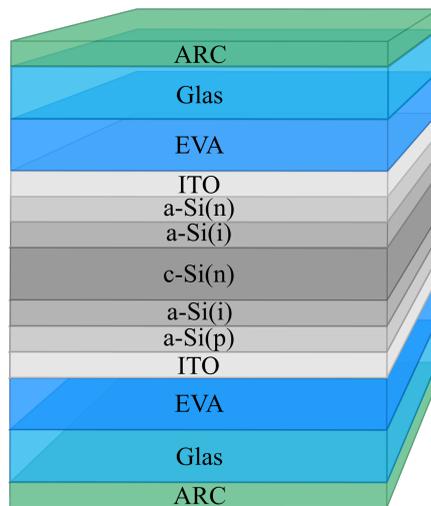


Abbildung 2.17: Schematische Darstellung des Aufbaus eines bifazialen Si-Solarmoduls auf Basis einer HIT-Solarzelle mit transparentem Rückkontakt. Der verwendete Aufbau der HIT-Solarzelle ist invertiert (p-i-n).

Zudem hat die Stärke der Albedo einen Einfluss auf das optimale Design. In Kapitel 5.3 über den EY von bifazialen Perowskit/Si 2T Solarmodulen wird unter anderem die Abhängigkeit von optimaler Schichtdicke und Bandlücke des Perowskits hinsichtlich der Albedo analysiert.

3 Simulationsmodell

Bei der Programmierung des in dieser Arbeit verwendeten Simulationsmodells zur Berechnung des EY von Tandem-Solarzellen waren mehrere Personen beteiligt. Diese sind neben dem Autor (M.Sc. Jonathan Lehr) Dr. Malte Langenhorst (ehemaliger Doktorand am IMT, Karlsruher Institut für Technologie), Dr. Raphael Schmager (ehemaliger Doktorand am IMT, Karlsruher Institut für Technologie) und Dr. Ulrich Wilhelm Paetzold (Gruppenleiter am IMT und LTI, Karlsruher Institut für Technologie). Die Simulationsplattform basiert auf den vier Modulen Strahlungsdichte, Optik, Elektrik und Energieertrag. In Abbildung 3.1 ist ein vereinfachtes Flussdiagramm der Berechnung des EY zu sehen.

Das Modul Strahlungsdichte wurde von Dr. Ulrich Wilhelm Paetzold entwickelt. Dr. Malte Langenhorst fertigte das Modul Optik an. Das Modul Elektrik wurde von M.Sc. Jonathan Lehr angefertigt und von Dr. Raphael Schmager erweitert. Das Modul Energieertrag wurde von Dr. Raphael Schmager entwickelt und von M.Sc. Jonathan Lehr um das Albedo-Modell und die Simulation der bifazialen Solarzellen sowie der Abschattung des Bodens erweitert.

In diesem Kapitel wird zuerst auf die Berechnung der direkten und diffusen Strahlung sowie der Albedo-Strahlung im Modul Strahlungsdichte eingegangen. Anschließend werden die optischen Modelle Transfer-Matrix-Methode (TMM) und Mehrfach-Reflexion sowie das Lambert-Beer'sche Gesetz für die Lichtausbreitung im Schichtsystem der Solarzelle erläutert. Daraufhin wird das Eindiodenmodell und ein Temperaturmodell der Solarzelle auf Basis der Lichteinstrahlung im Modul Elektrik beschrieben. Weiter wird auf die Berechnung der richtungsabhängigen Lichteinstrahlung für eine geneigte Solarzelle sowie auf die Berechnung des EY eingegangen. Schließlich wird im Detail das verwendete Modell für Abschattungsverluste bei bifazialen Solarzellen erläutert. Auf Teile oder Erweiterungen des Simulationsmodells, welche für die Ergebnisse in dieser Arbeit nicht verwendet wurden, wird nicht eingegangen.

3.1 Simulation der Strahlungsdichte

3.1.1 Direkte und diffuse Einstrahlung

Das Modul Strahlungsdichte wurde von Dr. Ulrich Wilhelm Paetzold entwickelt. Die Berechnung der Strahlungsdichte basiert auf meteorologischen Daten zur Einstrahlung, Sonnenposition und Umgebungstemperatur. Diese Daten werden aus dem Datensatz TMY3 (engl. typical meteorological year) entnommen, der die Messdaten mit einer stündlichen Auflösung an etlichen Orten in den USA wiedergibt [63]. Es sind Orte in unterschiedlichen klimatischen Zonen und an verschiedenen Breitengraden aufgeführt, was eine repräsentative Analyse des EY ermöglicht. Die Einstrahlung ist hierbei charakterisiert durch die Größen GHI (engl. global horizontal irradiance), DNI (engl. direct normal irradiance) und DHI (engl. diffuse horizontal irradiance), welche die jeweilige Intensität der Strahlung angeben. Die Sonnenposition ist durch den Höhenwinkel $\theta_{S,0}$ und Azimut $\varphi_{S,0}$ der Sonne relativ zum Boden des Orts angegeben, worüber sich die Einstrahlungsrichtung des direkten

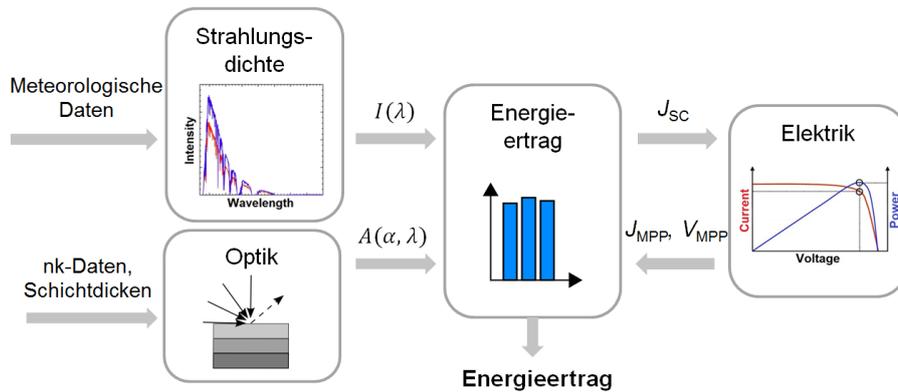


Abbildung 3.1: Flussdiagramm für die Simulation des EY. Die Eingangsgrößen für das Modul zur Strahlungsdichte sind meteorologische Daten sowie für das Modul Optik nk-Daten der Materialien und deren Schichtdicken. Das Modul Energieertrag greift für die Berechnung des EY auf das Modul Elektrik zurück, welches die Kenngrößen der Solarzelle berechnet.

Lichtanteils auf den flachen Boden bestimmen lässt. Der diffuse Lichtanteil hingegen entsteht durch Lichtstreuung in der Atmosphäre und ist isotrop. Auf die Verwendung der Umgebungstemperatur wird in Kapitel 3.3 zur Bestimmung der elektrischen Leistung eingegangen. Anhand des Datensatzes TMY3 lassen sich prinzipiell saisonale Einflüsse der Einstrahlungsintensität und des Sonnenstands sowie der Einfluss des Sonnenstands im Tagesverlauf auf den EY untersuchen.

Das Spektrum der Einstrahlung wird unter anderem anhand des Modells SMARTS (engl. Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine) berechnet [64]. Das zugehörige Programm ist in das Modul zur Berechnung der Strahlungsdichte eingebettet. Neben der Intensität unterscheidet sich auch die spektrale Verteilung des direkten und des diffusen Lichtanteils. Das Spektrum der diffusen Strahlung ist im Vergleich zur direkten Strahlung in den häufigsten Fällen aufgrund der Rayleigh-Streuung an den Stickstoff- und Sauerstoffmolekülen blauverschoben. Morgens und abends ist entsprechend das gesamte Spektrum blauverschoben, auch wenn die direkte Strahlung wegen des niedrigen Sonnenstands rotverschoben ist, da der diffuse Anteil dominiert. Die Spektren für direkte und diffuse Strahlung werden mit dem Programm SMARTS ermittelt, basierend auf Modellen, die nur bei klarem Himmel gelten. Der Einfluss von Wolken wird mittels eines einfachen Modells approximiert, das Werte zur Wolkenbedeckung aus dem Datensatz TMY3 verwendet. Dabei wird das Spektrum des diffusen Anteils unter dem Einfluss von Wolken neu berechnet. Die Details sind in "Methodology of energy yield modelling of perovskite-based multi-junction photovoltaic" von Schmager *et al.* veröffentlicht [62]. Das Spektrum des direkten Lichtanteils wird nicht korrigiert, da die Einstrahlung von direktem Licht nur aus wolkenlosen Bereichen des Himmels auf den Boden auftritt. Die resultierenden Spektren für direkte und diffuse horizontale Strahlung werden für jeden Zeitschritt berechnet und mittels des Datensatzes TMY3 auf die Intensität des eingestrahnten Lichts normiert. Dabei wird die direkte horizontale Strahlung aus DNI über

$$I_{\text{direkt}}^{\text{horizontal}} = I_{\text{direkt}}^{\text{normal}} \cdot \cos(\theta_S) \quad (3.1)$$

berechnet. In Abbildung 3.2 sind beispielhafte Spektren für den Ort Daggett (Kalifornien) gezeigt.

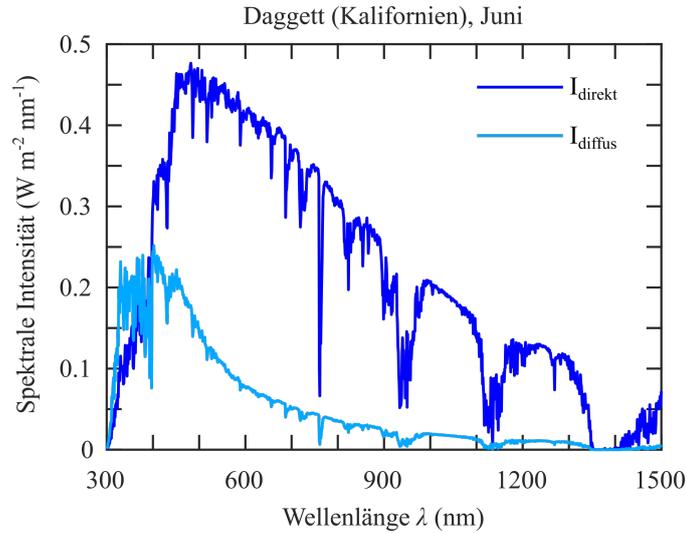


Abbildung 3.2: Spektren der mittleren spektralen Einstrahlung von direktem und diffusem Licht am Ort Daggett (Kalifornien) im Monat Juni. Die direkte Einstrahlung ist ausgeprägt, da der Ort in der Wüste mit aridem Klima liegt.

3.1.2 Albedo-Modell

Die Berechnung der Einstrahlung wurde vom Autor (M.Sc. Jonathan Lehr) durch ein Albedo-Modell erweitert, um den EY von bifazialen Solarzellen zu berechnen. Die am Boden reflektierte Strahlung trifft maßgeblich auf der Rückseite der Solarzelle auf. Für die Reflexion der Strahlung am Boden wird eine lambertsche Streuung angenommen. Die Intensität des eingestrahnten Lichts am Boden ist die Summe von direkter horizontaler Strahlung und diffuser horizontaler Strahlung. Die Intensität der Albedo-Strahlung ist im Wesentlichen vom Reflexionsvermögen des Bodens abhängig. Zur Berechnung wird in dem hier verwendeten Albedo-Modell die spektrale Reflexion $R_A(\lambda)$ des Bodens verwendet. Die Reflexionsspektren verschiedener Untergründe wurden hierzu aus der Datenbank ECOSTRESS (engl. Ecosystem spaceborne thermal radiometer experiment on space station) entnommen [65, 66]. In Abbildung 3.3 ist beispielhaft das Reflexionsspektrum von Gras gezeigt. Für die Lichtabsorption in Perowskit/Si Tandem-Solarzellen ist der Spektralbereich von 300 bis 1200 nm relevant. Die Reflexionsdaten mancher Untergründe sind teilweise nicht über den gesamten relevanten Wellenlängenbereich verfügbar. Die Daten weisen nur geringfügige Fehlstellen auf und werden durch Interpolation bzw. Extrapolation der vorhandenen Daten vervollständigt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird in dieser Arbeit der Reflexionsgrad von Böden über den gemittelten Albedo-Wert $\overline{R_A}$ angegeben. $\overline{R_A}$ gibt hierbei das arithmetische Mittel der spektralen Reflexion $R_A(\lambda)$ im Wellenlängenbereich 300-1200 nm an. Die Albedo-Strahlung wird mit der spektralen Reflexion $R_A(\lambda)$ über

$$I_{\text{albedo}}(\lambda) = R_A(\lambda) \cdot \frac{I_{\text{direkt}}^{\text{horizontal}}(\lambda) + I_{\text{diffus}}^{\text{horizontal}}(\lambda)}{\pi} \quad (3.2)$$

berechnet. Der Faktor π dient zur Normierung der Albedo-Strahlung, da eine anschließende Integration über alle Raumwinkelelemente in Polarkoordinaten im Modul Energieertrag erfolgt. Bei der Integration werden die Beiträge aus allen Richtungen aufgesammelt, unter denen Albedo-

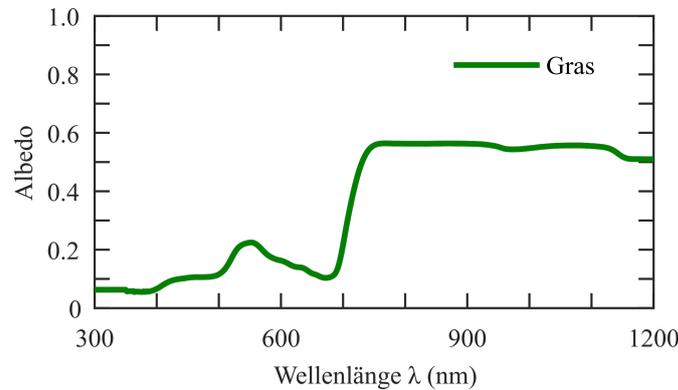


Abbildung 3.3: Reflexionsspektrum von Gras, basierend auf den Daten der Bibliothek ECOSTRESS, zur Berechnung der Albedo-Strahlung. Der entsprechende mittlere Albedo-Wert für Gras ist 35%. Der sprunghafte Anstieg der Reflexion bei der Wellenlänge 700 nm ist eine Besonderheit des Untergrunds Gras.

Strahlung auf die Vorder- bzw. Rückseite der Solarzelle fällt. Bei geneigter Solarzelle trifft zudem ein Teil der Albedo-Strahlung auf die Vorderseite der Solarzelle auf. Aus diesem Grund wird das Albedo-Modell auch zur präziseren Simulation von monofazialen Solarzellen angewendet.

3.2 Optische Simulation

Das Modul Optik wurde von Dr. Malte Langenhorst entwickelt [67]. In diesem Modul werden die optischen Eigenschaften des Schichtstapels einer Tandem-Solarzelle simuliert. Basierend auf den optischen Eigenschaften kann J_{SC} berechnet sowie die optischen Verluste analysiert werden. Die Berechnung von Absorption, Reflexion und Transmission des Schichtstapels eines Perowskit/Si Tandem-Solarmoduls erfordert die kombinierte Behandlung von dünnen Schichten mit einer Dicke im Bereich der Wellenlänge des Lichts und dicken Schichten, die deutlich größer als optische Wellenlängen sind. Zur erheblichen Reduktion der Rechenzeit wird die Lichtausbreitung in dünnen Schichten mit der TMM und in dicken inkohärenten Schichten mittels Reihenentwicklung simuliert. Zur Berechnung der Lichtabsorption in dicken Schichten wurde das Lambert-Beer'sche Gesetz implementiert und weiter für die Berechnung der Absorption im c-Si das Modell von Yablonoitch *et al.* [68] zur Steigerung der Lichtintensität in texturierten Si-Solarzellen angewandt. Beide Methoden sind gekoppelt, was eine effiziente Simulation von Schichtstapeln mit beliebiger Abfolge von dünnen und dicken Schichten ermöglicht. Die Textur der Oberfläche von c-Si wird mithilfe von statistischem Raytracing berechnet, was in Kapitel 3.2.2 beschrieben wird. Aus der im Modul Optik bestimmten winkelabhängigen Absorption erfolgt anschließend im Modul Energieertrag die Berechnung von J_{SC} .

Bei der Simulation von bifazialen Solarzellen wird Licht einfallend auf der Vorder- und Rückseite der Solarzelle eingekoppelt. Im Gegensatz zur einfachen Simulation der Lichtausbreitung bei monofazialen Solarzellen mit ausschließlicher Lichteinkopplung an der Vorderseite, erfolgt bei bifazialen Solarzellen eine getrennte Berechnung für Licht aus beiden Richtungen. Die getrennte Berechnung der Absorption für eingekoppeltes Licht an Vorder- und Rückseite wird anschließend im Modul Energieertrag zusammengeführt.

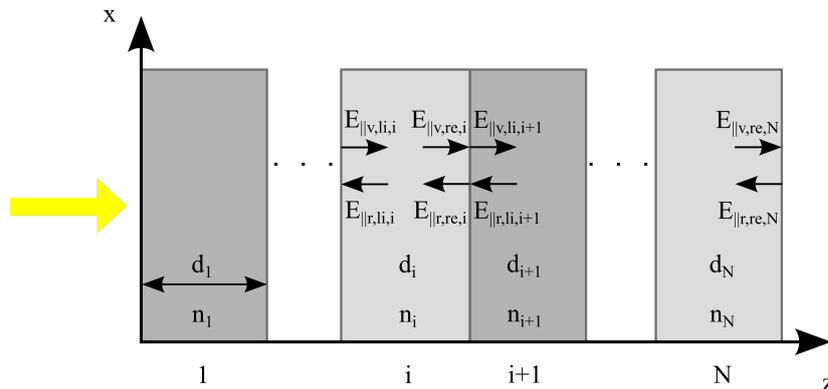


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung eines Dünnschichtstapels zur Berechnung des elektrischen Felds E entlang des Schichtstapels mit der Transfer-Matrix-Methode. An den Grenzflächen zwischen zwei Schichten sind die zur Grenzfläche parallelen Komponenten des elektrischen Felds jeweils für die vorwärts laufende ebene Welle $E_{||v}$ und für die rückwärts laufende Welle $E_{||r}$ eingetragen. Dabei stehen die Indizes “li” für linker Rand und “re” für rechter Rand einer Schicht. Der komplexe Brechungsindex der i -ten Schicht ist mit n_i und die Schichtdicke mit d_i gekennzeichnet.

3.2.1 Methoden

Dieses Kapitel geht auf die verwendeten Methoden zur optischen Simulation von Perowskit/Si Tandem-Solarzellen ein. Die zugehörigen Modelle wurden von Dr. Malte Langenhorst in das Simulationsmodell integriert [67]. Die Behandlung der c -Si-Textur erfolgt aus Gründen der Übersicht separat im folgenden Unterkapitel 3.2.2. Die Eingangsgrößen für das entsprechende Modul Optik sind der komplexe Brechungsindex der verwendeten Materialien im relevanten Wellenlängenbereich von 300 bis 1200 nm sowie die Dicke der Schichten.

Die optischen Größen Absorption, Reflexion und Transmission eines Stapels aus dünnen Schichten oder einzelner dünner Schichten werden mithilfe der weit verbreiteten TMM berechnet [69]. Im Folgenden werden kurz die Kernpunkte der TMM beschrieben. Bei der TMM wird die kohärente Lichtausbreitung der elektromagnetischen Wellen in einem Dünnschichtstapel mithilfe von Matrizen zur Propagation in einzelnen Schichten sowie zum Übergang an einer Grenzfläche zwischen zwei Schichten berechnet. Das elektrische Feld und das magnetische Feld einer elektromagnetischen Welle sind direkt über die Maxwell-Gleichungen verknüpft und daher genügt die Berechnung des elektrischen Felds. Bei dieser Methode wird die Interferenz von einer vorwärts und einer rückwärts laufenden ebenen elektromagnetischen Welle berechnet. Das zugehörige Schema ist in Abbildung 3.4 skizziert. Die Amplitude und Phase des elektrischen Felds lassen sich an beliebiger Position im Dünnschichtstapel aus der Amplitude und Phase am rückseitigen Ende des Schichtstapels berechnen. Dazu werden die Matrizen für Propagation und Übergang an einer Grenzfläche entsprechend aufeinander folgend multipliziert. Die winkelabhängigen Reflexions- und Transmissionskoeffizienten an den Übergängen werden für beide elektromagnetischen Wellen mit senkrechter (transversalelektrischer (TE)) und paralleler (transversalmagnetischer (TM)) Polarisation über die Fresnelschen Formeln berechnet. Mit der TMM wird das elektrische Feld für beliebige Einfallswinkel und für beide Polarisationen berechnet. Über das Betragsquadrat des elektrischen Felds und den komplexen Brechungsindex des Materials kann die Absorpti-

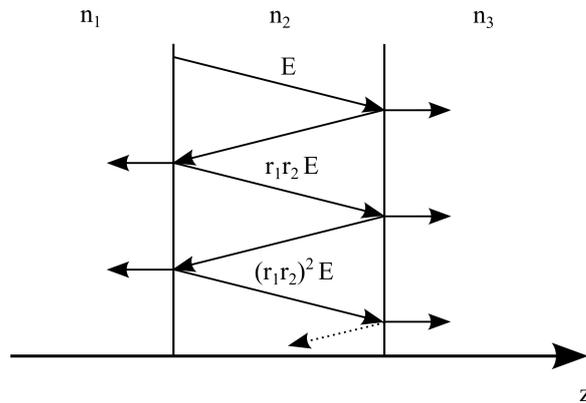


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung der Vielfach-Reflexion eines Lichtstrahls am Beispiel einer transparenten Schicht. Die Reflexionskoeffizienten resultieren aus der Reflexion der Teilstrahlen an den Übergängen zu den angrenzenden Schichten. Die gesamte Reflexion und Transmission der mittleren Schicht kann durch Reihenentwicklung des Produkts $r_1 \cdot r_2$ berechnet werden.

on in einer Schicht bestimmt werden. Die Absorption entspricht der negativen Divergenz des Poynting-Vektors $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$, welcher den Energiefluss einer elektromagnetischen Welle angibt. Das Betragsquadrat des elektrischen Felds resultiert aus dem Vektor-Produkt von elektrischem und magnetischem Feld. Die Absorption in den einzelnen Schichten erfolgt über die Berechnung und Differenzbildung des Energieflusses.

Die Lichtausbreitung in Schichten mit einer Dicke größer als der Wellenlänge des Lichts wird in der Simulation inkohärent behandelt. Bei der Vielfach-Reflexion der elektromagnetischen Wellen innerhalb einer dicken Schicht oder innerhalb des gesamten Schichtstapels interferieren die reflektierten Teilstrahlen aufgrund der großen Weglänge nicht mehr. Für die Berechnung der Absorption in einer dicken Schicht ist die Bestimmung von Reflexion und Transmission an beiden Grenzflächen zwischen der Schicht und den angrenzenden Schichten nötig. Dazu wird die Vielfach-Reflexion eines eingekoppelten Lichtstrahls sowie der entstehenden Teilstrahlen betrachtet. Die Reflexion bzw. Transmission der Schicht entspricht dann der Summe aus der Reflexion bzw. Transmission aller Teilstrahlen. Die elektrische Feldstärke eines in der Schicht verbleibenden Teilstrahls verringert sich bei jedem Durchlauf um den Faktor $r_1 \cdot r_2$. Abbildung 3.5 veranschaulicht die Vielfach-Reflexion innerhalb einer dicken Schicht. Entsprechend werden Reflexion und Transmission durch Reihenentwicklung des Produkts aus den beiden Reflexionskoeffizienten $r_1 \cdot r_2$ an den jeweiligen Grenzflächen mit den benachbarten Schichten berechnet.

Bei inkohärenter Lichtausbreitung in einer dicken Schicht kann die Absorption gut durch das Lambert-Beer'sche Gesetz beschrieben werden. Die Extinktion ist dabei proportional zur Schichtdicke und wird über den Extinktionskoeffizient k' des komplexen Brechungsindex $n = n' + ik'$ im Material wiedergegeben. Die Intensität des Lichts im Medium fällt dabei exponentiell mit zunehmender Weglänge z ab.

$$I_z = I_0 \cdot e^{-\frac{4\pi k'}{\lambda} \cdot z} \quad (3.3)$$

Dabei ist der Absorptionskoeffizient α über

$$\alpha = \frac{4\pi k'}{\lambda} \quad (3.4)$$

verknüpft mit dem Extinktionskoeffizient k' und der Wellenlänge λ . Entsprechend wird die Absorption einer Schicht im optischen Modell mit der Formel

$$A_{\text{Lambert-Beer}} = 1 - T = 1 - e^{-\frac{4\pi k'}{\lambda} \cdot d} \quad (3.5)$$

berechnet. Zur Bestimmung der Absorption bei winkelabhängiger Einstrahlung wird die Weglänge neu berechnet. Die Weglänge unter einem Winkel θ wird dann mit $\frac{1}{\cos(\theta)} \cdot d$ berechnet.

In der Perowskit/Si Tandem-Solarzelle werden die dicken Schichten Glas, EVA und c-Si inkohärent und mittels Vielfach-Reflexion und Lambert-Beer'schen Gesetz behandelt. Alternativ kann die Lichtabsorption im c-Si mittels eines Wegverlängerungsfaktors Z für den effektiven Lichtweg berechnet werden. In diesem Fall wird die Reflexion des Lichts an der Rückseite der Si-Solarzelle vernachlässigt. Stattdessen wird die Absorption im c-Si mithilfe von Z berechnet:

$$A_Z = 1 - e^{-\frac{4\pi k'}{\lambda} \cdot d \cdot Z} \quad (3.6)$$

Dabei wird der Wegverlängerungsfaktor Z des effektiven Lichtwegs für verschiedene Texturen des c-Si aus der Literatur entnommen [70, 71]. Die dünnen Schichten sind neben der gesamten Perowskit-Solarzelle das ARC sowie die Schichten a-Si(i), a-Si(p), a-Si(n) und ITO der Si-Solarzelle. Die zugehörigen Schichtstapel oder einzelnen Schichten werden mit der TMM behandelt. Die Kopplung der verschiedenen Methoden erfolgt im Optik Modul und es werden die resultierende spektrale und winkelabhängige Absorption $A_i(\theta, \lambda)$ in jeder Schicht i sowie Reflexion $R(\theta, \lambda)$ und Transmission $T(\theta, \lambda)$ des Schichtstapels ausgegeben. Diese Daten werden zum einen für die spektrale Analyse hinsichtlich optischer Verluste verwendet und zum anderen für die Berechnung von J_{SC} im Modul Energieertrag.

3.2.2 Kristallines Silizium mit Textur

Die in diesem Kapitel beschriebenen Methoden wurden von Dr. Malte Langenhorst in die Simulationsplattform eingearbeitet [67]. Für die Optimierung von Si-Solarzellen ist die Textur der Oberfläche von Si ein wesentlicher Faktor. Die Strukturgröße der Textur liegt im Bereich von wenigen Mikrometern. Die Textur streut einfallendes Licht am Übergang vom angrenzenden Medium in das Si und erhöht dabei unter anderem die Transmission. Durch Ätzen von c-Si mit der Kristallorientierung (100) können verschiedene pyramidenförmige Strukturen erzeugt werden, an denen Lichtstrahlen durch mehrfache Reflexion wesentlich besser in das Si übergehen. Beim Auftreffen eines Lichtstrahls an der Oberfläche wird der reflektierte Teilstrahl mit hoher Wahrscheinlichkeit erneut auf die Oberfläche auftreffen und im Vergleich zu einer flachen Oberfläche wird auf diese Weise die Transmission erhöht. Die Reflexion eines Lichtstrahls innerhalb einer Pyramide an der texturierten Oberfläche ist in Abbildung 3.6 veranschaulicht. In dieser Arbeit werden die bereits genannten drei Texturen mit Pyramiden in der Form (1) random upright, (2) regular upright und (3) regular inverted untersucht. Für die Simulation der Texturen wird die Methode von Baker-Finch und McIntosh angewandt [72, 73], welche auf statistischem Raytracing

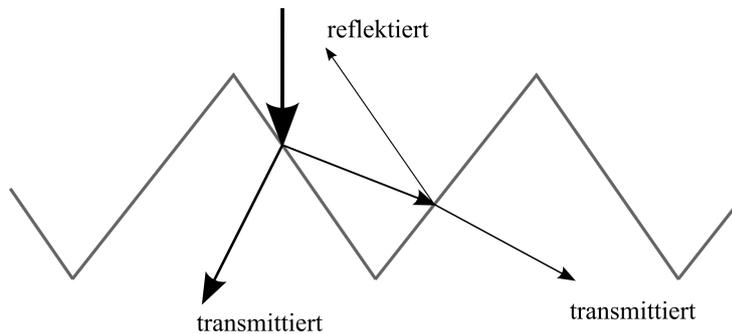


Abbildung 3.6: Schematische Darstellung der Reflexion eines Lichtstrahls an einer pyramidenförmigen Textur, wie sie bei c-Si zur Erhöhung der Lichteinkopplung eingesetzt wird. Durch mehrfache Reflexion wird die Transmission des Lichtstrahls an der Oberfläche erhöht. Dies ist beispielhaft anhand eines möglichen Pfades veranschaulicht.

(zu Deutsch Strahlverfolgung) basiert. Zum besseren Verständnis wird die Methode im Folgenden näher erläutert. Bei dieser Methode werden alle möglichen Ausbreitungsrichtungen von reflektierten und transmittierten Teilstrahlen nach mehrfacher Reflexion an der Pyramidenstruktur bestimmt, sowie die Häufigkeit jeder Ausbreitungsrichtung. Zur Berechnung der optischen Größen im vorliegenden Schichtsystem genügt die Bestimmung des Winkels θ_{out} zwischen resultierendem Strahl und der Richtung entlang des Schichtstapels. Die azimutale Orientierung des ausgehenden Strahls ist dabei unerheblich. Die Berechnung der Parameter wird für Strahlen mit beliebiger Einfallrichtung θ_{in} durchgeführt. Diese Berechnung erfolgt einmalig und die resultierenden Parameter werden anschließend bei Bedarf aus einer angelegten Datenbank aufgerufen. Für die Texturen regular upright und regular inverted ist das Problem aufgrund der Periodizität der Struktur grundsätzlich einfacher lösbar als für random upright. Die vier Facetten aller Pyramiden behalten über das Bauteil hinweg aufgrund der einheitlichen Orientierung (100) des c-Si-Kristalls dieselbe Ausrichtung. Da die Simulation für eine Vielzahl von θ_{in} erfolgt, wird Raytracing auch für regular upright und regular inverted eingesetzt. Vor allem bei der Textur random upright wird der Nutzen von Raytracing klar, da die ausgehenden Strahlen aufgrund der zufälligen relativen Positionen der Pyramiden in sehr viele verschiedene Richtungen laufen. Mithilfe der über Raytracing erzeugten Datenbanken für die drei Texturen werden die oben genannten Parameter sowohl für reflektiertes als auch transmittiertes Licht bestimmt.

Das Modul Optik ist für die Platzierung der Textur an der Vorderseite sowie an der Rückseite des c-Si ausgelegt. Es können beliebige Kombinationen der drei Texturen sowie flaches c-Si an der Vorderseite und Rückseite simuliert werden. Aufgrund der Reduktion von Reflexionsverlusten durch eine Textur an der Vorderseite von c-Si kann die Lichteinkopplung über das gesamte Spektrum im Vergleich zum flachen Si erhöht werden. Zudem wird der effektive Lichtweg durch den flacheren Eintrittswinkel in das Si vergrößert, was eine erhöhte Absorption zur Folge hat. Eine Textur an der Rückseite hat maßgeblich Einfluss auf Light-Trapping und erhöht die Absorption von Licht im Infraroten. Infrarotes Licht, das nach dem ersten Durchgang durch c-Si an der texturierten Rückseite reflektiert wird, wird erneut aufgefächert und durchläuft das c-Si unter einem flacheren Winkel und einem größeren effektiven Lichtweg. Licht mit kurzer Wellenlänge hingegen wird bereits beim ersten Durchgang durch das c-Si vollständig absorbiert ohne die Rückseite zu erreichen.

3.3 Elektrische Simulation

Die Berechnung der elektrischen Kenngrößen von Einfach- und Tandem-Solarzellen wird im Modul Elektrik durchgeführt. Das Modul wurde hauptsächlich vom Autor (M.Sc. Jonathan Lehr) angefertigt und durch Dr. Raphael Schmager um die Temperaturabhängigkeit der Leistung einer Solarzelle erweitert. Die Berechnung der J - U -Kennlinie basiert auf dem Eindiolenmodell einer Solarzelle. Im folgenden Kapitel wird detailliert auf das verwendete Eindiolenmodell eingegangen. Das Eindiolenmodell beschreibt die elektrischen Verluste beim Ladungsträgertransport in einer Solarzelle. Über die J - U -Kennlinie wird der Arbeitspunkt MPP berechnet und somit die elektrische Leistungsdichte P_{el} der Solarzelle bestimmt. Der Einfluss der Temperatur auf die Leistung der Solarzelle wird mittels eines Temperaturmodells beschrieben, auf welches im zweiten Teil dieses Kapitels eingegangen wird. Die genaue Berechnung der Temperatur in einer Solarzelle ist aufgrund vieler Einflüsse schwierig, weshalb hier für die Approximation der Temperatur auf das NOCT-Modell (engl. nominal operating cell temperature) zurückgegriffen wird. Die berechneten Kenngrößen der Solarzelle werden für die weitere Analyse und zur Berechnung des EY an das Modul Energieertrag übergeben.

3.3.1 Eindiolenmodell

Das elektrische Verhalten einer Solarzelle kann mithilfe des Eindiolenmodells beschrieben werden, welches ähnlich zur Shockley-Gleichung für die Kennlinie einer Diode ist. Im Wesentlichen wird für die Beschreibung einer Solarzelle die Shockley-Gleichung um die Terme für die generierte Photostromdichte J_{Ph} , den Serienwiderstand R_S und den Parallelwiderstand R_P der Solarzelle erweitert. Die Gleichung für die Stromdichte in einer Einfach-Solarzelle ist

$$J(U) = J_{Ph} - J_0 \left(e^{\frac{q(U+JR_S)}{nk_B T}} - 1 \right) - \frac{U + JR_S}{R_P} \quad (3.7)$$

mit der Sperrsättigungsstromdichte J_0 (engl. reverse saturation current), der Elementarladung q , dem Idealitätsfaktor n , der Boltzmann-Konstante k und der Temperatur T der Solarzelle [74].

Das Modell wird im Folgenden zunächst für eine Einfach-Solarzelle erläutert und anschließend für eine Tandem-Solarzelle mit 2T- und 4T-Verschaltung. Das Ersatzschaltbild des Eindiolenmodells ist in Abbildung 3.7 zu sehen. Die nötigen Eingangsparameter für die Berechnung von Perowskit- und Si-Solarzellen sind J_{Ph} , J_0 , n , R_S und R_P . Die Gleichung 3.7 ist weder nach J noch nach U auflösbar und somit nicht direkt lösbar. Unter Verwendung der Lambert-W-Funktion (LambertW) kann die Gleichung explizit gelöst werden [75]. LambertW ist die Umkehrfunktion von $f(x) = xe^x$. Die entsprechende Formel zur Berechnung von U_{OC} lautet

$$U_{OC} = J_{Ph} R_P - nk_B T \text{ LambertW} \left(\frac{J_0 R_P}{nk_B T} \exp \left(\frac{R_P (J_{Ph} + J_0)}{nk_B T} \right) \right) + J_0 R_P \quad (3.8)$$

und die J - U -Kennlinie wird über die Gleichung

$$U(J) = -J(R_S + R_P) + J_{Ph} R_P - nk_B T \text{ LambertW} \left(\frac{J_0 R_P}{nk_B T} \exp \left(\frac{R_P (-J + J_{Ph} + J_0)}{nk_B T} \right) \right) + J_0 R_P + U_{OC} \quad (3.9)$$

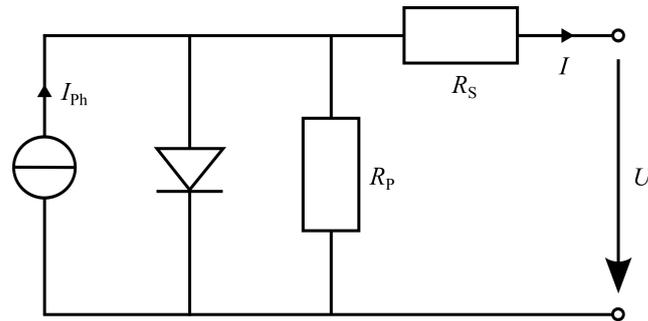


Abbildung 3.7: Ersatzschaltbild des Eindiodenmodells einer Solarzelle. Von der Stromquelle geht der Photostrom I_{ph} aus. Auf den resultierenden Strom I der Solarzelle wird das charakteristische Verhalten einer Diode aufgeprägt. Elektrische Verluste werden durch den seriellen Widerstand R_S sowie den parallelen Widerstand R_P beschrieben.

berechnet.

Für eine gute Wiedergabe der J - U -Kennlinien genügt bei den vorliegenden Solarzellen die Annahme eines idealen unendlich großen parallelen Widerstands R_P . Entsprechend entfällt der letzte Summand in Gleichung 3.7. Nach Umformung der resultierenden Gleichung nach U lässt sich die J - U -Kennlinie über die Funktion

$$U(J) = nk_B T \cdot \ln \left(\frac{J_{\text{ph}} - J}{J_0} + 1 \right) - J R_S + U_{\text{OC}} \quad (3.10)$$

berechnen. Im Simulationsmodell wurde das Eindiodenmodell optional mit R_P entsprechend Gleichung 3.9 und ohne R_P entsprechend Gleichung 3.10 implementiert. Für die Ergebnisse in der vorliegenden Arbeit wurde das Eindiodenmodell ohne R_P verwendet und die entsprechenden Parameter wurden aus der Literatur entnommen. Denn in der zugrunde liegenden Literatur wird die J - U -Kennlinie häufig nur über die Parameter J_0 , n und R_S des Eindiodenmodells angepasst.

Für J_{ph} wird die im Modul Energieertrag berechnete Kurzschlussstromdichte J_{SC} übergeben. Der Parameter für die Sammlungseffizienz der Ladungsträger geht bereits im Modul Energieertrag in die Berechnung von J_{SC} ein. Die Sperrsättigungsstromdichte J_0 ist sehr klein, üblicherweise im Bereich von wenigen pA cm^{-2} , welche bei negativ angelegter Spannung ohne Beleuchtung im Bauteil fließt. Der Idealitätsfaktor n ist ein Maß für die Abweichung der Solarzelle von der Gleichung einer idealen Diode. Über den Idealitätsfaktor können Rückschlüsse auf die Art des in der Solarzelle vorliegenden Rekombinationsmechanismus gezogen werden. Der serielle Widerstand R_S sowie der parallele Widerstand R_P beschreiben elektrische Verluste. Hierbei beschreibt R_S die Widerstände von den Metall-Halbleiter-Kontakten sowie die Widerstände der Elektroden. Der parallele Widerstand R_P beschreibt z.B. Leckströme, die durch Kurzschlüsse wegen inhomogenen Schichten oder durch Defekte auftreten können. Dabei weist eine gute Solarzelle mit wenigen Defekten einen hohen parallelen Widerstand R_P und damit kaum Leckströme auf.

In dieser Arbeit werden Perowskit-Solarzellen mit variierender Bandlücke E_G untersucht. Die elektrischen Parameter für die Beschreibung der Solarzellen mit dem Eindiodenmodell werden

an E_G des Perowskits angepasst. Das wird im Folgenden beschrieben. J_0 wird über den linearen Zusammenhang zwischen dem Logarithmus aus J_0 und E_G

$$\ln(J_0) \sim -\frac{E_G}{nk_B T} \quad (3.11)$$

entsprechend der verwendeten Methode in Hörantner *et al.* für jede Bandlücke approximiert [9]. Für die Herleitung dieses Zusammenhangs wird die Gleichung für J_0

$$J_0(T) = q \int_0^\infty EQE(E) \phi_{Ph}(E, T) dE \quad (3.12)$$

verwendet. Dabei ist q die Elementarladung, $EQE(E)$ die externe Quanteneffizienz der Perowskit-Solarzelle und $\phi_{Ph}(E, T)$ der Photonenfluss eines Schwarzkörpers mit der Energie E und der Temperatur T . Nach dem Planckschen Strahlungsgesetz [76] ist $\phi_{Ph}(E, T)$

$$\phi_{Ph}(E, T) = \frac{2\pi}{h^3 c^2} \frac{E^2}{\exp\left(\frac{E}{k_B T}\right) - 1} \quad (3.13)$$

mit dem Planckschen Wirkungsquantum h und der Lichtgeschwindigkeit c .

Der Parameter R_S wird anschließend angepasst, um einen linearen Zusammenhang zwischen U_{OC} und E_G herzustellen. Der Idealitätsfaktor n wird nicht verändert.

Zur Bestimmung des MPP wird nach der Berechnung der J - U -Kennlinie die Spannung U_{MPP} mit der maximalen Leistungsdichte $P_{el} = U_{MPP} \cdot J_{MPP}$ berechnet. Die Kenngrößen der Solarzelle werden entsprechend anhand der in Kapitel 2.2 beschriebenen Formeln bestimmt. Die Parameter U_{OC} , FF und P_{el} werden zur Analyse sowie zur Berechnung des EY an das Modul Energieertrag übergeben.

Die Berechnung der elektrischen Kenngrößen einer Tandem-Solarzelle mit 2T-Verschaltung weicht teilweise von der für Einfach-Solarzellen ab und wird im Modul Elektrik separat vorgenommen. Hierbei erfolgt zunächst die Berechnung der J - U -Kennlinien für jede Subzelle separat. In die Berechnung gehen die jeweiligen Eingangsparameter der Subzellen ein. Anschließend wird die J - U -Kennlinie der Tandem-Solarzelle über

$$U^{2T}(J) = U^{top}(J) + U^{bot}(J) - R_S^{2T} \cdot J \quad (3.14)$$

berechnet. Dabei werden die Spannungen der Subzellen addiert, entsprechend der Reihenschaltung der Subzellen. Die resultierende Spannung wird um den Spannungsabfall am Serienwiderstand R_S^{2T} der Tandem-Solarzelle reduziert. Der Serienwiderstand der Tandem-Solarzelle wird über

$$R_S^{2T} = R_S^{top} + R_S^{bot} \quad (3.15)$$

aus den Serienwiderständen der Subzellen R_S^{top} und R_S^{bot} festgelegt. Die Bestimmung des MPP und der Kenngrößen erfolgt bei der Tandem-Solarzelle mit 2T-Verschaltung analog zur Einfach-Solarzelle. Bei Currentmismatch ist die maximale Stromdichte J dabei gegeben durch J_{SC} der limitierenden Subzelle.

In einer Tandem-Solarzelle mit 4T-Verschaltung werden die Subzellen unabhängig voneinander betrieben. Bei der Berechnung der Kenngrößen wird entsprechend jede Subzelle als Einfach-Solarzelle behandelt. Die Berechnung des MPP erfolgt ebenso separat für jede Subzelle. Die

erzeugbare elektrische Leistungsdichte P_{el} einer Tandem-Solarzelle mit 4T-Verschaltung wird dann aus der Summe von P_{el} der Subzellen

$$P_{el}^{4T} = P_{el}^{top} + P_{el}^{bot} \quad (3.16)$$

berechnet. Die Größe P_{el}^{4T} wird an das Modul Energieertrag übergeben. Für die weitere Analyse können die restlichen Kenngrößen der Subzellen verwendet werden. Der Tandem-Solarzelle mit 4T-Verschaltung selbst können keine weiteren Kenngrößen zugeordnet werden.

Das Verhalten der J - U -Kennlinien und damit der Kenngrößen von Perowskit- und Si-Solarzellen lässt sich mit dem verwendeten Eindiodenmodell gut wiedergeben. Insbesondere das Verhalten der modellierten Kenngrößen in Abhängigkeit der Einstrahlungsintensität ist in guter Übereinstimmung mit dem realen Verhalten in Solarzellen. Neben dem Eindiodenmodell gibt es Modelle wie das Zweidiodenmodell, die eine präzisere Beschreibung von Solarzellen ermöglichen. Die zugrunde liegenden Gleichungen für die J - U -Kennlinie lassen sich in diesen Fällen jedoch nicht explizit lösen. Hierfür sind komplexe Algorithmen notwendig, die sich beträchtlich auf Rechenaufwand und -zeit auswirken, was jedoch nicht dem eigentlichen Sinn des hier erarbeiteten recheneffizienten Simulationsmodells entsprechen würde.

3.3.2 Temperaturmodell

Die Temperatur der Solarzelle hat einen Einfluss auf die elektrischen Eigenschaften und damit auf den EY. Die Modultemperatur T_M wird neben der intrinsischen Thermalisierung von Elektronen im Halbleiter z.B. durch Wärmeleitung über die angrenzenden Schichten, die Aufständigung des Moduls, die umgebende Luft und Windgeschwindigkeit sowie durch Wärmestrahlung beeinflusst. Eine präzise Berechnung von T_M erfordert hohen Aufwand und ist daher nicht Gegenstand dieser Arbeit. Das verwendete NOCT-Modell approximiert die Temperatur der Solarzelle in Abhängigkeit der Intensität der Sonneneinstrahlung anhand der nominellen Temperatur der Solarzelle im Betrieb. Hierfür wird der von Ross *et al.* empirisch gefundene lineare Zusammenhang der Sonneneinstrahlung und der Temperaturdifferenz zwischen Solarzelle und Luft verwendet [77]. Der entsprechende mathematische Zusammenhang ist

$$T_M = T_U + \frac{\text{NOCT} - 20 \text{ }^\circ\text{C}}{800 \text{ W m}^{-2}} \cdot S \quad (3.17)$$

mit der Umgebungstemperatur T_U und der Intensität der Sonneneinstrahlung S . Dabei gibt NOCT die Temperatur des Moduls bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C, einer Windgeschwindigkeit von 1 m s⁻¹ und einer Sonneneinstrahlung von 800 W m⁻² an. T_U wird aus dem Datensatz TMY3 entnommen, S wird im Modul Energieertrag berechnet und an das Modul Elektrik übergeben und für NOCT wird 48 °C entsprechend für auf dem Boden installierte Module angenommen [78]. Zusammenfassend bietet das implementierte Modell eine Abschätzung der Modultemperatur unter Berücksichtigung von Daten zur Temperatur der Umgebung sowie zur Intensität der Sonneneinstrahlung.

Unter den Kenngrößen der Solarzelle wird hauptsächlich U_{OC} durch die Temperatur beeinflusst. U_{OC} macht nach Green *et al.* 80-90% der gesamten Temperatursensitivität der Solarzelle aus [79]. Im vorliegenden Modell wird neben U_{OC} auch die Temperaturabhängigkeit von I_{SC} berücksichtigt. Dabei wird die Abhängigkeit dieser Größen von T_M durch einen linearen Zusammenhang genähert

und mittels Temperaturkoeffizienten beschrieben. Die Temperaturabhängigkeit der Kenngrößen ergibt sich damit über

$$U_{OC}(T) = U_{OC,0} (1 + TC_{U_{OC}} (T - T_0)) \quad (3.18)$$

$$I_{SC}(T) = I_{SC,0} (1 + TC_{I_{SC}} (T - T_0)) \quad (3.19)$$

mit den Temperaturkoeffizienten $TC_{U_{OC}}$ für U_{OC} , $TC_{J_{SC}}$ für J_{SC} , der Temperatur $T_0 = 25 \text{ °C}$ (STC), sowie der Leerlaufspannung $U_{OC,0}$ und dem Kurzschlussstrom $I_{SC,0}$ unter STC. Die Temperaturkoeffizienten geben dabei die Änderung von U_{OC} und I_{SC} pro Kelvin an. Für die Perowskit- und Si-Solarzellen werden die Temperaturkoeffizienten aus der Literatur entnommen [80, 81, 82, 83]. Bei der Berechnung der J - U -Kennlinie (Gleichungen 3.9 und 3.10) werden U_{OC} und I_{SC} durch die temperaturabhängigen Größen ersetzt. Der Betrag von $TC_{U_{OC}}$ ist aufgrund der hohen Temperatursensitivität von U_{OC} um etwa einen Faktor 10 größer als $TC_{J_{SC}}$. Aufgrund der Abnahme von U_{OC} mit steigender Temperatur ($TC_{U_{OC}} < 0$), wird folglich der resultierende EY mit steigender Temperatur geringer.

3.4 Simulation des Energieertrags

Die Berechnung des EY wird in dem zugehörigen Kernmodul Energieertrag des Simulationsmodells durchgeführt. Das Modul wurde von Dr. Raphael Schmager entwickelt und von M.Sc. Jonathan Lehr für die Berechnung von bifazialen Solarmodulen erweitert. Die Übergabe der Parameter aus den anderen Modulen kann anhand des Flussdiagramms in Abbildung 3.1 nachvollzogen werden. Dieses Kapitel beschreibt das Kernmodul und umfasst alle wesentlichen Aspekte zur Berechnung des EY. Es wird auf die richtungsabhängige Einstrahlung der direkten und diffusen Strahlung vom Himmel sowie der Albedo-Strahlung vom Boden eingegangen, sowie auf die Transformation in das Bezugssystem einer beliebig ausgerichteten Solarzelle. Weiter wird die Berechnung von J_{SC} anhand der Einstrahlung sowie die Berechnung von EY aus der elektrischen Leistungsdichte P_{el} erläutert. Im letzten Teil des Kapitels wird die Behandlung von Abschattungsverlusten bei bifazialen Solarzellen beschrieben. Das Modell zur Abschattung des Bodens wurde vom Autor implementiert und wird im Detail erläutert.

Mithilfe des numerischen Modells zur Bestimmung des EY werden im Rahmen dieser Arbeit eine Reihe von Parametern systematisch analysiert, wie z.B. der Einfluss des Modulwinkels und der spektralen Einstrahlung in verschiedenen klimatischen Zonen auf den EY. Weiter wird ein Vergleich verschiedener Bauteilarchitekturen durchgeführt sowie die Optimierung des Schichtstapels hinsichtlich Parametern wie Ort und Albedo sowie Architektur der Tandem-Solarzellen und deren elektrischer Konfiguration. Die veränderbare Bandlücke des Perowskits in Abhängigkeit der Komposition bildet einen weiteren freien Parameter in der Optimierung von Perowskit/Si Tandem-Solarzellen. Die Abhängigkeit des EY von der Bandlücke wird in dieser Arbeit ebenfalls untersucht.

3.4.1 Lichteinstrahlung

Die Lichteinstrahlung ist für die drei Typen direkte Einstrahlung, diffuse Einstrahlung und Albedo-Strahlung verschieden und muss dementsprechend im Simulationsmodell getrennt behandelt werden. Die drei Typen unterscheiden sich in der Richtung und der Art der jeweils ausgehenden

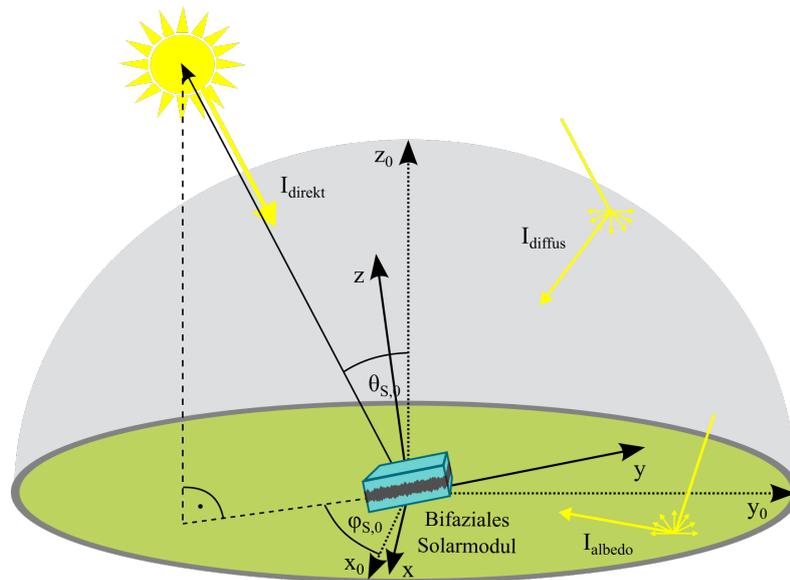


Abbildung 3.8: Lichteinstrahlung auf ein beliebig gekipptes Solarmodul. Die direkte Strahlung trifft aus Richtung der Sonne ($\theta_{S,0}$, $\varphi_{S,0}$) auf das Solarmodul auf. Die Koordinaten der Sonnenposition werden für die weitere Berechnung in das Koordinatensystem des gekippten Moduls transformiert. Die diffuse Strahlung trifft aus dem gesamten Bereich des Himmels (grauer Bereich) und die Albedo-Strahlung aus dem gesamten Bereich des Bodens (grüner Bereich) auf das Solarmodul auf.

Lichtquelle. Auf Grundlage des Datensatzes TMY3 mit stündlicher Aufzeichnung von direkter und diffuser Einstrahlung sowie der Sonnenposition wird die richtungsabhängige Bestrahlung für jeden Zeitschritt berechnet und schließlich P_{el} der Solarzelle ermittelt.

Für die Berechnung des direkten Anteils muss die Position der Sonne in das Koordinatensystem der Solarzelle übertragen werden. Denn bei geneigter Solarzelle ändert sich die Ausrichtung des Koordinatensystems relativ zu dem des Bodens, wie in Abbildung 3.8 veranschaulicht. Entsprechend werden Höhenwinkel $\theta_{S,0}$ und Azimut $\varphi_{S,0}$ der Sonne zur Bestimmung der Einfallrichtung des direkten Lichts in das Bezugssystem der Solarzelle transformiert. Die resultierenden Winkel θ_S und φ_S dienen unter anderem als Kriterium, ob das direkte Licht im Fall einer geneigten Solarzelle auf die Vorder- oder Rückseite der Solarzelle auftrifft. Während die rückseitige Bestrahlung bei monofazialen Solarzellen keinen Beitrag liefert, wird das Licht bei bifazialen Solarzellen aufgesammelt. Der transformierte Höhenwinkel θ_S der Sonne wird im Weiteren zur Bestimmung der absorbierten Lichtleistungsdichte des direkten Anteils benötigt. Die Abschattung von Solarzellen durch Objekte in der Umgebung wie z.B. andere Solarmodule oder Häuser wird in diesem Simulationsmodell nicht berücksichtigt.

Für den diffusen Anteil der Bestrahlung, die vom Himmel ausgeht, wird eine lambertsche Lichtverteilung angenommen. Die Bestrahlungsintensität ist in diesem Fall isotrop und die Berechnung erfolgt in Polarkoordinaten. Für die Berechnung der absorbierten Lichtleistungsdichte des diffusen Anteils in der Solarzelle ist nur der Höhenwinkel der einfallenden Strahlung relevant, da die Einkopplung des Lichts in die Solarzelle nur vom Einfallswinkel relativ zur Oberfläche der Solarzelle abhängt. Die Bestimmung der diffusen Einstrahlung $I_{diffus}(\theta)$ wird zunächst über die Diskretisie-

nung einer Halbkugel-Oberfläche gelöst. Dabei werden die Bereiche der Halbkugel-Oberfläche definiert, aus denen Licht auf die Vorder- bzw. Rückseite der geneigten Solarzelle auftrifft. Die Definition erfolgt mithilfe einer Funktion $\Gamma(\theta, \varphi)$, die den Wert 1 für die Richtungen annimmt, unter denen die Solarzelle beleuchtet wird, und sonst 0 ist. $I_{\text{diffus}}^{\text{vorne}}(\theta)$ und $I_{\text{diffus}}^{\text{hinten}}(\theta)$ ergeben sich über

$$I_{\text{diffus}}^i(\theta) = \frac{I_{\text{diffus}}^{\text{horizontal}}}{\pi} \cdot \int \Gamma^i(\theta, \varphi) d\varphi \quad (3.20)$$

mit der normierten diffusen horizontalen Strahlung $I_{\text{diffus}}^{\text{horizontal}}/\pi$.

Die Albedo-Strahlung entsteht durch diffuse Streuung am Erdboden und wird wie die diffuse Einstrahlung vom Himmel mit einer lambertschen Verteilung behandelt. Im idealisierten Fall ohne Berücksichtigung von Abschattung des Bodens durch die Solarzelle wird die absorbierte Lichtleistungsdichte der Albedo-Strahlung analog zur diffusen Einstrahlung vom Himmel berechnet. In diesem Fall werden die Bereiche definiert, aus denen Licht vom Boden auf die Vorder- bzw. Rückseite der geneigten Solarzelle trifft. Anschließend wird die Integration über die Kugeloberfläche des zum Boden zugehörigen Halbraums durchgeführt. Die Berechnung der normierten Intensität der Albedo-Strahlung I_{albedo} , über die dabei integriert wird, wurde bereits in Kapitel 3.1.2 über das Albedo-Modell definiert.

3.4.2 Berechnung des Energieertrags

Der EY einer Solarzelle innerhalb eines Jahres wird im Simulationsmodell über das zeitliche Integral der generierten Leistungsdichte P_{el} bestimmt. P_{el} wird im Modul Elektrik für jeden Zeitschritt aus J_{SC} berechnet. Im vorangehenden Kapitel wurde die Bestimmung der richtungsabhängigen spektralen Einstrahlung für direkten und diffusen Anteil sowie für Albedo-Strahlung erläutert. Die absorbierte Lichtleistungsdichte wird im Fall von direkter Einstrahlung auf Basis der winkelabhängigen Absorption $A_{\text{Absorber } i}(\theta, \lambda)$ in den Absorberschichten i aus dem Modul Optik sowie der direkten Einstrahlung DNI berechnet. Dabei wird im Wesentlichen das eingestrahelte Spektrum DNI mit der spektralen Absorption unter dem Winkel θ_S bei jeder Wellenlänge multipliziert. Die absorbierte Lichtleistungsdichte für den diffusen Anteil wird durch Multiplikation von $I_{\text{diffus}}(\theta)$ und $A_{\text{Absorber } i}(\theta, \lambda)$ und anschließender Integration über θ berechnet, um alle Beiträge des diffusen Anteils aufzusammeln. Die Albedo-Strahlung wird analog zum diffusen Anteil behandelt.

Aus den jeweils absorbierten Lichtleistungsdichten werden unter Berücksichtigung der Photonenergie $E_{\text{Ph}}(\lambda)$ durch Integration über die Wellenlänge λ die zugehörigen Kurzschlussstromdichten $J_{\text{SC}}^{\text{direkt}}$, $J_{\text{SC}}^{\text{diffus}}$ und $J_{\text{SC}}^{\text{albedo}}$ in der Solarzelle bestimmt. Die resultierende J_{SC} wird über

$$J_{\text{SC}}^{\text{total}} = J_{\text{SC}}^{\text{direkt}} + J_{\text{SC}}^{\text{diffus}} + J_{\text{SC}}^{\text{albedo}} \quad (3.21)$$

berechnet. Bei Perowskit/Si Tandem-Solarzellen ergeben sich $J_{\text{SC}}^{\text{total, top}}$ und $J_{\text{SC}}^{\text{total, bot}}$ über die absorbierte Lichtleistungsdichte im Perowskit- bzw. Si-Absorber. Die anschließende Berechnung von MPP und P_{el} wird im Modul Elektrik durchgeführt. Das Modul Elektrik berechnet zur Validierung neben P_{el} alle weiteren Kenngrößen der Solarzellen für Einzel- sowie Tandem-Solarzellen mit 2T- und 4T-Verschaltung. Im Fall der 2T-Verschaltung geht der geringere J_{SC}

$$J_{\text{SC}} = \min(J_{\text{SC}}^{\text{top}}, J_{\text{SC}}^{\text{bot}}) \quad (3.22)$$

in die Berechnung der J - U -Kennlinie ein, der den Strom in der Tandem-Solarzelle limitiert. Die Berechnung der Kenngrößen der Solarzelle wurde im Detail in Kapitel 3.3 erläutert. Der EY der Solarzelle ergibt sich schließlich aus der zeitlichen Integration über $P_{el}(t)$:

$$EY = \int_{\text{Jahr}} P_{el}(t) dt \quad (3.23)$$

Der EY ist eine realistische Größe für die Leistung einer Solarzelle über ein typisches meteorologisches Jahr hinweg und wird in dieser Arbeit neben der Quantifizierung des Ertrags als Maß zur Optimierung der Solarzellen herangezogen.

3.4.3 Abschattungsverluste bei bifazialen Solarzellen

Das Model zur Berechnung der Abschattungsverluste wurde vom Autor (M.Sc. Jonathan Lehr) angefertigt. Die Abschattung des Bodens unter bifazialen Solarzellen reduziert im Wesentlichen die rückseitig auf ein Modul auftreffende Albedo-Strahlung und somit den EY des Moduls. Insbesondere bei geringen Aufstellhöhen werden die Verluste in der Albedo-Strahlung signifikant, da der Schatten auf dem Boden direkt unter dem Modul auftrifft. Das Modell berechnet die vom Boden ausgehende richtungsabhängige Albedo-Strahlung für eine einzelne Modulreihe mit unendlich langer Ausdehnung neu. Die Behandlung der am Boden reflektierten Strahlung erfolgt hierbei getrennt für die am Boden auftreffende direkte Strahlung, im Folgenden genannt als reflektierte direkte Strahlung, und die am Boden auftreffende diffuse Strahlung, genannt als reflektierte diffuse Strahlung. In anderen Worten, der Schatten des Moduls durch direkte Sonneneinstrahlung wird getrennt von dem Schatten durch diffuse Sonneneinstrahlung behandelt. Im Fall der reflektierten direkten Strahlung kann dabei das Problem auf zwei Dimensionen vereinfacht werden. Die zugehörigen normierten Intensitäten für die reflektierte direkte Strahlung und die reflektierte diffuse Strahlung sind:

$$\begin{aligned} I_{\text{albedo,direkt}}^{\text{horizontal}} &= R_A \cdot \frac{I_{\text{direkt}}^{\text{horizontal}}}{\pi} \\ I_{\text{albedo,diffus}}^{\text{horizontal}} &= R_A \cdot \frac{I_{\text{diffus}}^{\text{horizontal}}}{\pi} \end{aligned} \quad (3.24)$$

Im folgenden Teil wird auf die Berechnung der reflektierten direkten Strahlung eingegangen. Der Verlust durch den Schatten des Moduls ist proportional zu dem Sichtfaktor des Schattens SF_{Schatten} . In zwei Dimensionen gilt der allgemeine Zusammenhang $SF = \frac{\zeta}{\pi}$ zwischen dem Sichtwinkel ζ im Bogenmaß und dem zugehörigen Sichtfaktor SF. In diesem Fall handelt es sich um den Sichtwinkel aus Sicht des Moduls, unter dem der Schatten zu sehen ist. Für die Berechnung der reflektierten direkten Strahlung wird in Anlehnung an Sun *et al.* [84] die Formel

$$I_{\text{albedo,direkt}} = \int I_{\text{albedo,direkt}}(\theta) \cdot (1 - SF_{\text{Schatten}} \cdot \frac{L_S}{B}) d\theta \quad (3.25)$$

verwendet. Dabei ist L_S die Schattenlänge und B die Breite des Solarmoduls. L_S wird über

$$L_S = B \cdot \left(\cos(\beta) + \frac{\cos(\gamma - \varphi_{S,0}) \sin(\beta)}{\tan(90^\circ - \theta_{S,0})} \right) \quad (3.26)$$

Für die Berechnung von $I_{\text{albedo,direkt}}(\theta)$ aus Gleichung 3.25 wird analog zur Berechnung der diffusen Einstrahlung vom Himmel $I_{\text{diffus}}(\theta)$ in Gleichung 3.20 zuerst die Integration über

$$I_{\text{albedo,direkt}}(\theta) = I_{\text{albedo,direkt}}^{\text{horizontal}} \cdot \int \Gamma_{\text{Boden}}(\theta, \varphi) \, d\varphi \quad (3.29)$$

nach φ durchgeführt. Hierbei wird das reflektierte direkte Licht aus allen Bereichen aufgesammelt, aus denen grundsätzlich Licht auf das geneigte Solarmodul auftreffen kann. Die Funktion $\Gamma_{\text{Boden}}(\theta, \varphi)$ ist entsprechend 1 für alle Richtungen vom Boden unter denen die Solarzelle beleuchtet wird, und sonst 0.

Für die reflektierte diffuse Strahlung wird die am Boden auftreffende diffuse Einstrahlung vom Himmel unter dem Einfluss der Abschattung durch das Solarmodul neu berechnet. Die Intensität der diffusen Einstrahlung wird dabei für jeden Ort am Boden mithilfe eines Sichtfaktors $\text{SF}_{\text{Himmel}}$ in Anlehnung an Sun *et al.* [84] berechnet. Für die Bestimmung des Sichtfaktors sind in Abbildung 3.10 die zugehörigen Sichtwinkel ζ_c und ζ_d für einen beliebigen Punkt am Boden mit den Koordinaten (θ, φ) aufgeführt. Die beiden Sichtwinkel definieren den Bereich, aus dem diffuse Strahlung vom Himmel auf dem Boden auftrifft. Dabei erfolgt die Definition der Sichtwinkel bei einer Modulreihe mit unendlich langer Ausdehnung in zwei Dimensionen. Der entsprechende Sichtfaktor $\text{SF}_{\text{Himmel}}$ wird über

$$\text{SF}_{\text{Himmel}} = \frac{\zeta_c + \zeta_d}{\pi} \quad (3.30)$$

berechnet und gibt die Intensität der diffusen Einstrahlung unter dem Einfluss von Schatten am Boden an. In Formel 3.30 sind die Sichtwinkel ζ_c und ζ_d im Bogenmaß aufgeführt. Da die Sichtwinkel von der Position (θ, φ) des Punktes am Boden abhängen, ist auch der Sichtfaktor eine Funktion von θ und φ :

$$\text{SF}_{\text{Himmel}} = \text{SF}_{\text{Himmel}}(\theta, \varphi) \quad (3.31)$$

Hierbei muss $\text{SF}_{\text{Himmel}}(\theta, \varphi)$ abschnittsweise definiert werden. Die genaue Berechnung von $\text{SF}_{\text{Himmel}}(\theta, \varphi)$ im Simulationsmodell wird hier aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht weiter erläutert. Die reflektierte diffuse Einstrahlung auf das Solarmodul wird durch das Integral:

$$I_{\text{albedo,diffus}}(\theta) = I_{\text{albedo,diffus}}^{\text{horizontal}} \cdot \int \text{SF}_{\text{Himmel}}(\theta, \varphi) \Gamma_{\text{Boden}}(\theta, \varphi) \, d\varphi \quad (3.32)$$

nach φ berechnet.

Für die Bestimmung der absorbierten Lichtleistungsdichte durch Albedo-Strahlung unter dem Einfluss von Abschattung werden die resultierenden Strahlungsdichten $I_{\text{albedo,direkt}}$ (Gleichung 3.25) und $I_{\text{albedo,diffus}}$ für die reflektierte direkte und reflektierte diffuse Einstrahlung analog zur diffusen Einstrahlung vom Himmel in Kapitel 3.4.2 berechnet. Dabei werden für jeden Absorber i in der Solarzelle die Strahlungsdichten $I_{\text{albedo,direkt}}(\theta)$ (Gleichung 3.29) und $I_{\text{albedo,diffus}}(\theta)$ (Gleichung 3.32) mit $A_{\text{Absorber } i}(\theta, \lambda)$ multipliziert und anschließend das Integral über θ durchgeführt. In $J_{\text{SC}}^{\text{albedo}}$ sind schließlich beide Beiträge

$$J_{\text{SC}}^{\text{albedo}} = J_{\text{SC}}^{\text{albedo,direkt}} + J_{\text{SC}}^{\text{albedo,diffus}} \quad (3.33)$$

aus reflektierter direkter und reflektierter diffuser Strahlung zusammengefasst. Die getrennte Behandlung von direktem und diffusem Schatten des Solarmoduls ermöglicht eine gute Abschätzung der Verluste in der Albedo-Strahlung. Neben der Abschattung des Bodens unter dem Solarmodul

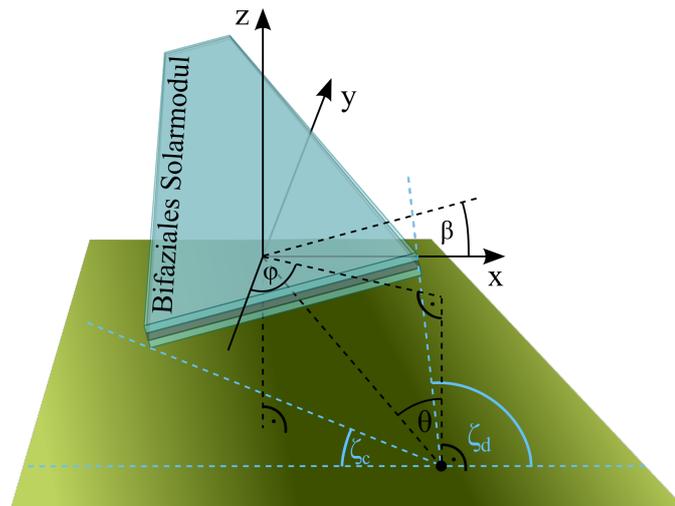


Abbildung 3.10: Schematische Darstellung eines bifazialen Solarmoduls mit Neigungswinkel β über dem Boden zur Berechnung des Sichtfaktors SF_{Himmel} an einem beliebigen Punkt am Boden. Es wird weiter das zugehörige Koordinatensystem mit Ursprung im Solarmodul definiert sowie die Koordinaten (θ, φ) des Punktes eingetragen. Die Sichtwinkel ζ_c und ζ_d geben den Winkelbereich an, unter dem bei Abschattung der diffusen Einstrahlung vom Himmel Licht auf den Boden auftrifft.

hat auch die direkte Verdeckung der Sonneneinstrahlung durch benachbarte Module (engl. self-shading) einen Einfluss auf den EY. Dieser Verlust wurde im Rahmen dieser Arbeit jedoch aus Zeitgründen nicht untersucht.

3.5 Zusammenfassung

Mit dem implementierten Simulationsmodell kann der EY unter realistischen Bedingungen für diverse Orte berechnet werden. Das eingeführte Modell bestehend aus den Modulen Strahlungsdichte, Optik, Elektrik und Energieertrag zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus. Auf Basis des Datensatzes TMY3 kann die Strahlungsdichte mit hoher zeitlicher Auflösung für jede Stunde an Orten aus verschiedenen Klimazonen berechnet werden. Für die Simulation der Albedo-Strahlung kann ebenso auf eine Vielzahl von Böden zurückgegriffen werden. Alle Berechnungen im Simulationsmodell wurden hinsichtlich der Rechenzeit optimiert. Aus diesem Grund wird die Lichtausbreitung in optisch dicken Schichten inkohärent behandelt und nur in optisch dünnen Schichten mit der TMM berechnet. Auch die Implementierung des Eindiodenmodells zur Berechnung der Stromdichte am MPP wurde auf zeiteffiziente Berechnungen ausgelegt. Im Modul Energieertrag werden schließlich alle Module zusammengeführt und es erfolgt die Berechnung der Stromdichte auf Basis der winkelaufgelösten Einstrahlung und der Absorption für eine beliebig geneigte Solarzelle. Für bifaziale Solarzellen wurde ein Modell zur Berechnung der Abschattungsverluste des Bodens implementiert. Dabei wird die Abschattung des Bodens getrennt für die Beleuchtung mit direkter Strahlung und für die Beleuchtung mit diffuser Strahlung behandelt. Mit dem Simulationsmodell wird der EY von Perowskit/Si Tandem-Solarzellen präzise und zeiteffizient berechnet.

4 Energieertrag von texturierten Perowskit-Silizium 2-Terminal Solarmodulen

Im Bereich der Photovoltaik liegen Perowskit/Si Tandem-Solarzellen aktuell im Fokus der Forschung und sind im Labor bereits leistungsstärker als die seit jeher markt-dominierende Si-Technologie geworden [88]. Perowskit-Solarzellen selbst zeichnen sich zudem durch eine kostengünstige Herstellung aus und es wird an der Optimierung verschiedener Abscheideverfahren für die hier eingesetzten Materialien geforscht [89, 90, 50]. Aufgrund verschiedener Herstellungsverfahren wird die Integration von Perowskit-Solarzellen in verschiedene Bauteilarchitekturen auf Basis von Si-Solarzellen denkbar. Texturierte Si-Solarzellen auf Basis von geätzten Si-Wafern weisen eine optimierte Lichteinkopplung auf, was sich im Vergleich zu planaren Si-Solarzellen signifikant auf eine Steigerung des Wirkungsgrads auswirkt. Ein Gegenstand dieser Arbeit ist die Analyse potentieller Architekturen von Perowskit/Si Tandem-Solarzellen unter Anwendung von Texturen des Si hinsichtlich der Effizienz. In diesem Kapitel wird der Wirkungsgrad unter Standardbedingungen und der EY von monofazialen Perowskit/Si 2T Solarmodulen untersucht. Zur Einschätzung des maximalen Potentials wird die Optimierung der Bauteile durchgeführt sowie der Ertrag an verschiedenen Standorten unter Optimierung des Modul-Neigungswinkels berechnet. Unter Berücksichtigung von verschiedenen Perowskit-Absorbern mit unterschiedlicher Bandlücke werden die Bauteile weiter auf Abhängigkeiten zwischen Architektur und optimaler Bandlücke untersucht.

Ein Großteil der Ergebnisse aus diesem Kapitel wurde im referierten Fachjournal **Sustainable Energy & Fuels**, **2**, **12**, **2754-2761**, (2018) veröffentlicht [91]. Diese Ergebnisse sind in den entsprechenden Abbildungen mit Quellennachweis gekennzeichnet.

4.1 Architekturen

Für die Beurteilung der Effizienz von monofazialen Perowskit/Si 2T Tandem-Solarmodulen werden drei verschiedene Bauteilarchitekturen untersucht. Die Architekturen sind in Abbildung 4.1 schematisch dargestellt. Architektur (i) basierend auf einer planaren Vorder- und Rückseite des c-Si wird als Referenz verwendet. Der gesamte Schichtstapel ist planar, da die dünnen Schichten der Perowskit-Solarzelle auf der Si-Solarzelle basierend auf einem flachen Si-Wafer abgeschieden werden. Architektur (ii) mit texturierter Vorder- und Rückseite des c-Si weist auch an der Oberseite der Perowskit/Si Solarzelle eine Texturierung auf. Die dünnen Schichten der Perowskit-Solarzelle werden auf der pyramidenförmigen Oberseite der Si-Solarzelle sequentiell aufgedampft und bedecken gleichförmig die gesamte Oberfläche der Si-Solarzelle [92]. Architektur (iii) ist an der Vorderseite des c-Si flach und an der Rückseite texturiert und basiert damit auf

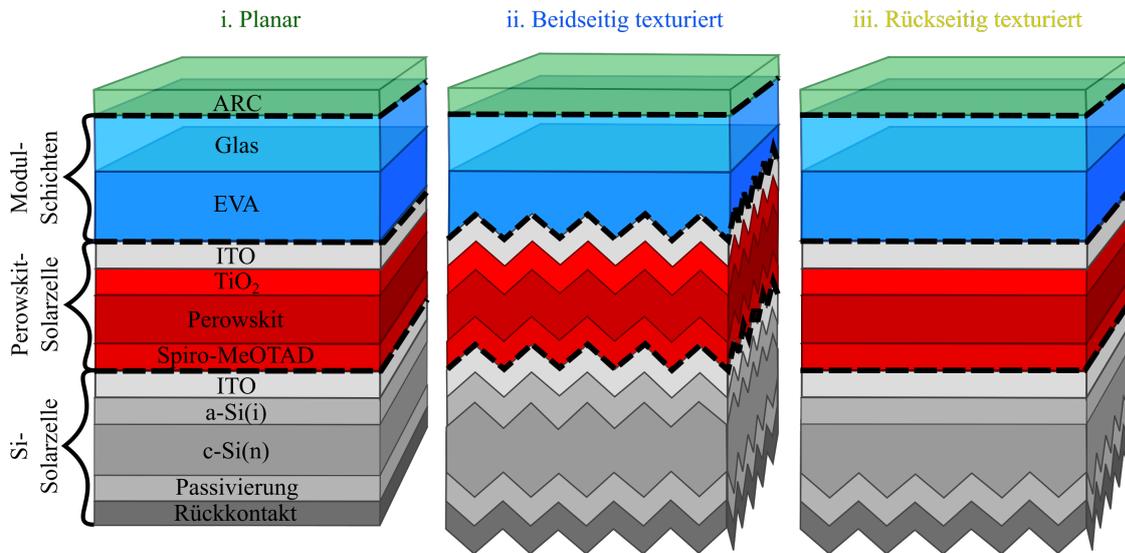


Abbildung 4.1: Darstellung der Architekturen für Perowskit/Si 2T Tandem-Solarmodule. (i) Architektur mit planarer Vorder- und Rückseite des c-Si, (ii) mit texturierter Vorder- und Rückseite des c-Si und (iii) mit planarer Vorderseite und texturierter Rückseite. Entnommen aus [91] und angepasst.

einem einseitig geätzten Si-Wafer. Der Schichtstapel der Perowskit-Solarzelle ist hierbei planar, entsprechend der flachen Oberseite der Si-Solarzelle. Auf Basis dieser Architektur wurde im Labor ein Wirkungsgrad von 26.0% erreicht, was künftig durch eine Verbesserung des FF noch weiter gesteigert werden könnte [93]. Die Untersuchung der Architekturen (ii) mit beidseitiger Texturierung und (iii) mit rückseitiger Texturierung ist von Interesse, da beide Architekturen Vor- und Nachteile bieten. Eine Schwierigkeit bei Architektur (ii) bringt die Herstellung der Schichten einer Perowskit-Solarzelle mit sich. Im Gegensatz zu einer planaren Oberfläche müssen hier die Schichten auf einer texturierten Oberfläche aufgedampft werden, um eine gleichmäßige Bedeckung zu erreichen [92, 94]. Bei flüssig-basierten Abscheidungsverfahren sammelt sich die Ausgangslösung der Stoffe in den Tälern der Struktur, bevor es zur Verdampfung der Lösung und damit zur Abscheidung der Feststoffe kommt. Die Herstellung mittels Abscheiden aus Lösung auf einer ebenen Oberfläche ist hingegen einfacher und kostengünstiger als mittels Aufdampfen.

Die Abfolge und Dicke der Schichten ist für alle Architekturen gleich. Hierbei wird für die Vorderseite der Si-Solarzelle der Schichtstapel c-Si (160 μm)/a-Si(i) (20 nm)/ITO (10 nm) verwendet. Für die Berechnung der Lichtabsorption im c-Si wurde hier das Modell zur Steigerung der Lichtintensität nach Yablonoitch *et al.* angewandt [68]. Der Schichtstapel der Perowskit-Solarzelle ist Spiro-MeOTAD (20 nm)/Perowskit (0-750 nm)/TiO₂ (20 nm)/ITO (120 nm). Die Vorderseite des Perowskit/Si 2T Tandem-Solarmoduls besteht aus EVA (300 μm)/Glas (3 mm)/ARC (130 nm). Die Bereiche der Kontaktfinger und Stromschienen sowie der Verdrahtung im Solarmodul werden in der Simulation vernachlässigt, da in dieser Arbeit das Augenmerk auf der Optimierung des Schichtstapels liegt.

Zur Einschätzung der Perowskit/Si 2T Solarmodule hinsichtlich ihrer Performance werden diese mit einem leistungsfähigen Si-Solarmodul verglichen. Das Referenzbauteil basiert auf einer texturierten IBC-Solarzelle von Yoshikawa *et al.* [3]. Das Modell des Solarmoduls ist in Abbildung 4.2

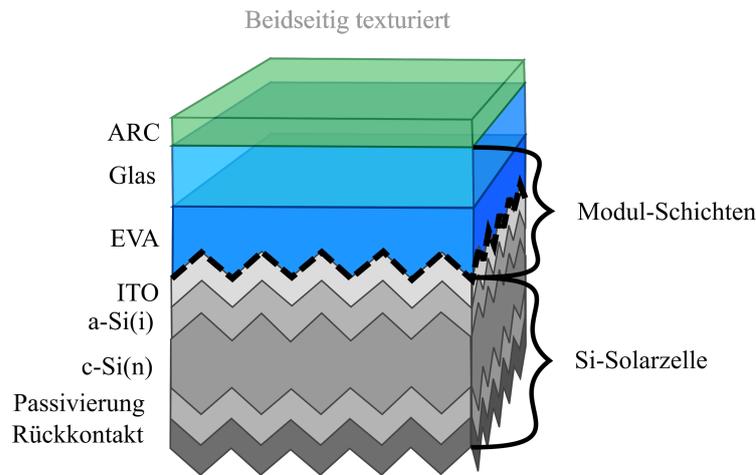


Abbildung 4.2: Darstellung der zugrunde liegenden Architektur für die Simulation von Si-Solarmodulen mit texturierter Vorder- und Rückseite des c-Si. Die Solarzelle dient als Referenz zum Vergleich mit Perowskit/Si 2T Tandem-Solarmodulen.

veranschaulicht. Dabei besteht die Textur sowohl an der Vorder- und Rückseite des c-Si aus aufrechten Pyramiden mit zufälliger Verteilung (random upright). Der simulierte Schichtstapel der Si-Solarzelle ist c-Si (160 μm)/a-Si(i) (10 nm)/ITO (70 nm). Die Schichten an der Rückseite sind bei dem Si-Solarmodul analog zu den Perowskit/Si 2T Solarmodulen nicht definiert, da die Lichtabsorption im c-Si über das Modell von Yablonoitch *et al.* berechnet werden. Der Schichtstapel an der Vorderseite ist EVA (300 μm)/Glas (3 mm)/ARC (130 nm).

4.2 Standardtestbedingungen

Zu Beginn werden die Bedingungen unter STC simuliert, um die Leistung der Solarmodule abzuschätzen. Dabei wird die Absorption und die Photostromdichte im Solarmodul unter senkrechtem Lichteinfall der Strahlung mit dem AM1.5g Spektrum bestimmt. Der Messstandard STC wurde im Detail in Kapitel 2.3.3 definiert. Auf diese Weise wird der Wirkungsgrad bestimmt und es kann ein allgemein gültiger Vergleich der Architekturen vorgenommen werden. In diesem Kapitel wird zuerst eine optische Analyse aller Architekturen unter senkrechtem Lichteinfall durchgeführt. Weiter werden die elektrischen Kenngrößen der Einzel- sowie Tandem-Solarzellen bestimmt. Abschließend wird die Anpassung des Schichtstapels in seriell geschalteten Tandem-Solarzellen demonstriert, um eine optimale Energieumwandlung im Bauteil zu erreichen. Hierbei wird die Schichtdicke des Perowskit-Absorbers für Currentmatching in den Subzellen angepasst. Bei der Herstellung von Perowskit/Si 2T Solarmodulen werden bereits optimierte Si-Hochleistungssolarzellen eingesetzt. Das Anpassen der Perowskit-Solarzelle hinsichtlich der Perowskit-Schichtdicke an die Si-Solarzelle ist daher ein vielversprechender Weg bei der Integration von Perowskiten in Perowskit/Si Tandem-Solarzellen.

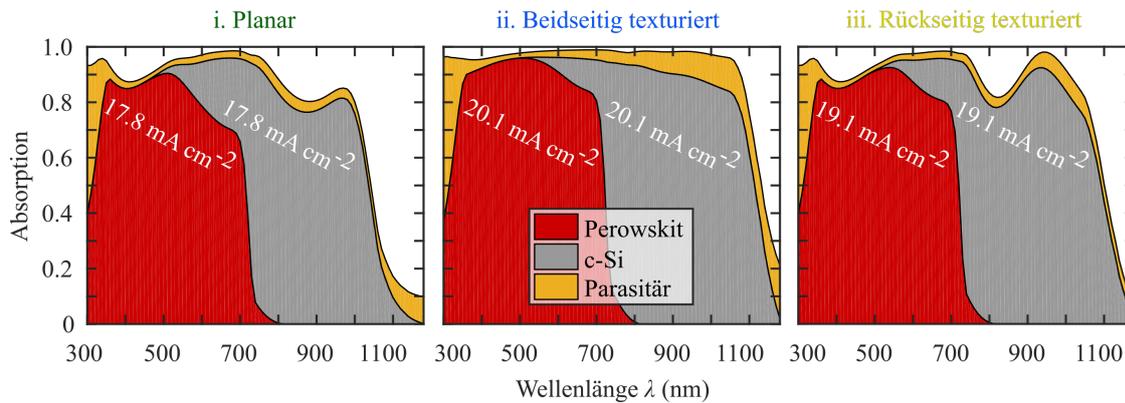


Abbildung 4.3: Absorptionsspektrum der Schichten Perowskit und c-Si sowie der parasitären Absorption in allen restlichen Schichten der Perowskit/Si 2T Solarmodule. Die Absorption ist für die drei Architekturen basierend auf (i) planarem c-Si, (ii) beidseitig texturiertem c-Si und (iii) c-Si mit planarer Vorderseite und texturierter Rückseite gezeigt. Zusätzlich ist die integrierte J_{SC} jedes Absorbers eingetragen. Entnommen aus [91] und angepasst.

4.2.1 Optische Analyse

Anhand der optischen Analyse können die Mechanismen zur Steigerung der Absorption in einem Perowskit/Si 2T Solarmodul nachvollzogen werden. Die spektrale Absorption unter senkrechtem Lichteinfall für die drei Architekturen i, ii und iii ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Der hier verwendete Perowskit hat eine Bandlücke von 1.72 eV. Diese Bandlücke liegt sehr nahe an der theoretischen optimalen Bandlücke eines Absorbers für ein Tandem auf Basis von Si-Solarzellen [31]. Die Absorption ist aufgeteilt in die Absorption in der Perowskit-Schicht, in der c-Si-Schicht sowie in die parasitäre Absorption in allen übrigen Schichten des Schichtstapels. Die parasitäre Absorption umfasst die Schichten ARC, transparente Elektroden, Elektron-, Lochleiter und Passivierung. Die Absorptionskante von Perowskit liegt entsprechend der Bandlücke bei rund 720 nm und im Fall von c-Si bei rund 1110 nm.

Der zugrunde liegende Schichtstapel der hier präsentierten Absorptionsspektren für jede Architektur weist eine optimierte Schichtdicke des Perowskit-Absorbers auf. Dabei fällt die Wahl auf die Schichtdicke, bei der Currentmatching in beiden Absorbern des Solarmoduls erreicht wird, um die Verluste durch ungleiche Ströme in einer 2T Solarzelle zu minimieren. Die Optimierung der Schichtdicke wird in Kapitel 4.2.3 behandelt. Die entsprechende J_{SC} unter STC ist in Abbildung 4.3 für jeden Absorber aufgeführt. Die Architektur (i) mit planarer Vorder- und Rückseite des c-Si weist deutliche Reflexionsverluste im gesamten optischen Spektralbereich aufgrund der relativ hohen Reflexion am flachen Schichtstapel auf. Bei Architektur (iii) mit rückseitig texturiertem c-Si ist die Absorption im c-Si über den Infrarot-Bereich hinweg gesteigert. Die Ursache liegt im Light-Trapping für langwelliges Licht. Dabei erreicht das Licht die Rückseite des c-Si und wird dort zurückgestreut. Der verlängerte Lichtweg im c-Si hat eine gesteigerte Absorption zur Folge. Die berechnete J_{SC} steigt durch Light-Trapping von 17.8 mA/cm² für Architektur (i) mit flacher Vorder- und Rückseite auf 19.1 mA/cm² für Architektur (iii) mit rückseitig texturiertem c-Si. Architektur (ii) mit Textur an der Vorder- und Rückseite von c-Si zeigt eine hohe Lichteinkopplung an der Vorderseite. Die mehrfache Reflexion von Lichtstrahlen an der pyramidenförmigen Textur führt zu einer verbesserten Lichteinkopplung. Aufgrund der vorder- und rückseitigen Textur wird

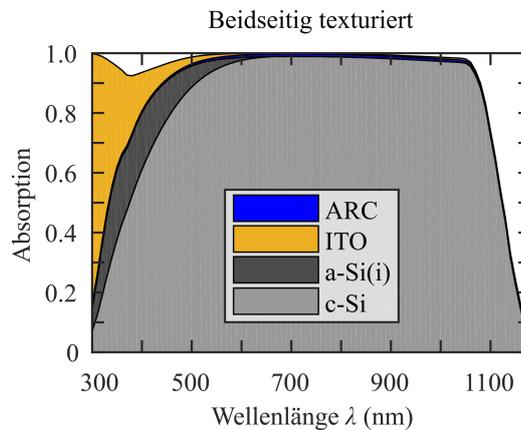


Abbildung 4.4: Absorption einer Si-Solarzelle mit der Textur random upright an der Vorder- und Rückseite des c-Si. Die Absorption ist aufgeteilt in die Schichten ARC, ITO, a-Si(i) und c-Si. Entnommen aus [91] und angepasst.

durch erhöhte Lichteinkopplung und Light-Trapping eine J_{SC} von 20.1 mA/cm^2 erreicht. Die steigende parasitäre Absorption ist auch auf die erhöhte Lichteinkopplung zurückzuführen.

Zum Vergleich der Perowskit/Si 2T Solarmodule wird mit dem Referenzbauteil wird abschließend eine Si-Solarzelle betrachtet. In Abbildung 4.4 wird das Absorptionsspektrum einer Si-Solarzelle mit beidseitiger Textur des c-Si gezeigt. Die Si-Solarzelle entspricht im Wesentlichen dem Si-Solarmodul bis auf die fehlenden Modulschichten EVA und Glas. Die Si-Solarzelle weist eine sehr hohe Absorption im c-Si über den gesamten optischen und infraroten Spektralbereich auf. Wie bei Architektur (ii) der Perowskit/Si 2T Solarmodule wird durch die Textur an der Vorder- und Rückseite eine hohe Lichtabsorption erreicht. Neben der frontseitigen Textur sorgt ein angepasstes ARC für die geringen Reflexionsverluste bei der Lichteinkopplung.

4.2.2 Elektrische Kenngrößen

Das elektrische Modell der Solarzellen muss die J - U -Charakteristik der realen Solarzellen möglichst genau wiedergeben, um eine realistische Berechnung der Leistung von texturierten Perowskit/Si 2T Solarmodulen zu ermöglichen. In diesem Kapitel werden sowohl die elektrischen Parameter zur Berechnung der J - U -Kennlinien als auch die resultierenden Kennlinien und elektrischen Kenngrößen erläutert. Die elektrischen Parameter für die Perowskit- und Si-Solarzellen sind in Tabelle 4.1 aufgeführt und bilden die Eingangsparameter zur Berechnung der Einfach-Solarzellen sowie der Tandem-Solarzellen mit dem Eindiodenmodell. In die Berechnung der J - U -Kennlinien geht weiter die zuvor berechnete J_{SC} des entsprechenden Absorbers ein. Das Eindiodenmodell wurde detailliert in Kapitel 3.3.1 beschrieben.

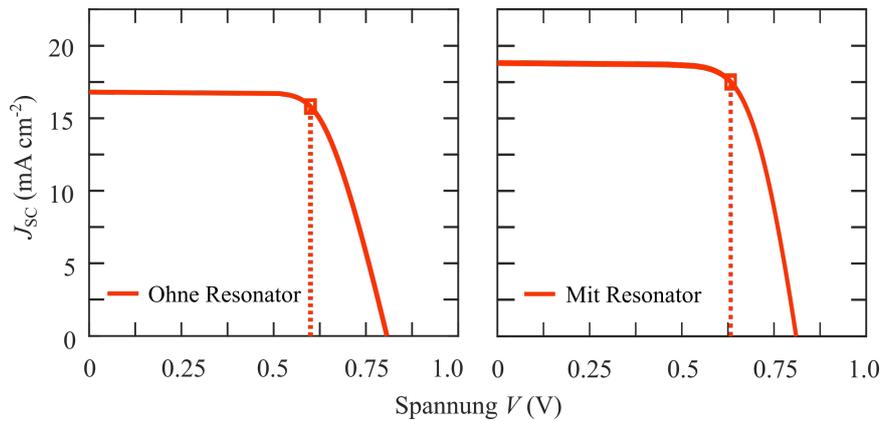


Abbildung 4.5: Darstellung der berechneten Kennlinien a) für die planare Perowskit-Solarzelle mit der Bandlücke 1.72 eV und b) für die an der Vorder- und Rückseite texturierte Si-Solarzelle als Referenzbauteil. Hierbei werden die Solarzellen unter STC beleuchtet und die entsprechende J_{SC} geht in die Berechnung der Kennlinie ein. Entnommen aus [91].

Solarzelle	J_0 (mA cm ⁻²)	n	R_S (Ω)
Perowskit 1.55 eV	$3 \cdot 10^{-11}$	1.43	4.1
Perowskit 1.66 eV	$1 \cdot 10^{-13}$	1.43	7.4
Perowskit 1.72 eV	$8 \cdot 10^{-15}$	1.43	8.9
Perowskit 1.80 eV	$2 \cdot 10^{-16}$	1.43	12.4
Perowskit 1.88 eV	$2 \cdot 10^{-18}$	1.43	16.9
Si	$1 \cdot 10^{-14}$	0.82	0.1

Tabelle 4.1: Liste der verwendeten elektrischen Parameter zur Berechnung der J - U -Kennlinie mit dem Eindiodenmodell. Die aufgeführten Parameter sind die Sperrsättigungsstromdichte J_0 , der Idealitätsfaktor n und der Serienwiderstand R_S .

Die Kennlinien für eine Perowskit-Solarzelle mit der Bandlücke 1.72 eV und metallischer Rückelektrode sowie für die Si-Solarzelle als Referenz für die Analyse der Perowskit/Si 2T Solarmodule sind in Abbildung 4.5 dargestellt. Die hier simulierten Kennlinien zeigen die Solarzellen unter Beleuchtung von 1000 W m^{-2} mit dem AM1.5g Spektrum bei $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (STC). Die zugehörigen Kenngrößen sind in Tabelle 4.2 aufgeführt. Neben der Perowskit- und Si-Solarzelle sind die berechneten Kenngrößen eines Perowskit/Si 2T Solarmoduls mit einer Bandlücke des Perowskits von 1.72 eV und angepasster Perowskit-Schichtdicke aufgeführt. Die verwendete Architektur (ii) der Tandem-Solarzelle basiert auf beidseitig texturiertem c-Si. Die etwa doppelte J_{SC} der Si-Solarzelle im Vergleich zur Perowskit-Solarzelle ist auf das breite Absorptionsspektrum von c-Si aufgrund der kleinen Bandlücke zurückzuführen. Die Kenngrößen der hier vorgestellten Referenzbauteile geben die Charakteristik von aktuellen Solarzellen wieder. Diese Grundlage lässt eine realistische Abschätzung der Effizienz von Tandem-Solarzellen auf Basis von Perowskit und Si zu, die der weiteren Analyse hinsichtlich des EY der Solarzellen dient.

Solarzelle	V_{OC} (V)	FF	J_{SC} (mA cm ⁻²)	η
Perowskit 1.72 eV	1.27	0.75	18.9	17.9%
Si	0.74	0.81	40.8	24.3%
Perowskit/Si 1.72 eV, optimiert*	1.98	0.79	20.1	31.6%

Tabelle 4.2: Simulierte Kenngrößen der drei Bauteile planare Perowskit-Solarzelle, beidseitig texturierte Si-Solarzelle und beidseitig texturiertes Perowskit/Si 2T Solarmodul.

*Bei dem Perowskit/Si 2T Solarmodul wurde die Perowskit-Schichtdicke optimiert, um die Ströme der Subzellen anzupassen (Currentmatching).

4.2.3 Optimierung der Schichtdicke

Für eine effiziente Leistung von Perowskit/Si 2T Solarmodulen muss der Schichtstapel angepasst werden, damit Licht optimal im Bauteil absorbiert wird. Wichtige Kriterien für die Optimierung sind die Architektur des Solarmoduls sowie die Beleuchtung. Da hochleistungsfähige Si-Solarzellen den Ausgangspunkt für die Herstellung von Perowskit/Si Solarmodulen bilden, ist die naheliegendste Lösung das Anpassen der Perowskit-Solarzelle an die Si-Solarzelle. Die Schichtdicke des Perowskits lässt sich durch die Herstellung verändern und ermöglicht die Regulierung der Menge des absorbierten Lichts. Damit lässt sich das Currentmatching in den Absorbern einstellen, welches für leistungsfähige 2T Tandem-Solarzellen erforderlich ist.

In der Simulation wird die Schichtdicke des Perowskits im Bereich von 0-750 nm optimiert. Innerhalb dieses Bereichs liegt die typische Schichtdicke von realen Perowskit-Solarzellen [95]. Das Verhalten der Ströme in den Subzellen eines monofazialen Perowskit/Si 2T Solarmoduls als Funktion der Perowskit-Schichtdicke ist in Abbildung 4.6 veranschaulicht. Die verwendete Architektur ist (ii) mit Textur an der Vorder- und Rückseite des c-Si. Mit steigender Dicke des Perowskits nimmt die Menge des absorbierten Lichts und damit der generierte Strom in der Perowskit-Solarzelle zu. Bei steigender Absorption im Perowskit verringert sich das verbleibende Licht für die Absorption im Si. Bei der Schichtdicke für Currentmatching wird der maximale Strom erzeugt. Hingegen bei Currentmismatch wird der Strom durch die Subzelle mit dem geringeren Photostrom limitiert.

Zur Abschätzung des maximalen Wirkungsgrads η zeigt Abbildung 4.7 η als Funktion der Perowskit-Schichtdicke für die drei Architekturen sowie die Si-Solarzelle als Referenz. Der jeweilige maximale Wirkungsgrad η wird im Bereich der Schichtdicke erreicht, bei der die Ströme in den Subzellen übereinstimmen. Die Simulation wird unter der Annahme durchgeführt, dass sich die elektrischen Eigenschaften der Perowskit-Solarzelle bei einer Variation der Perowskit-Schichtdicke nicht ändern. Wie bereits erwähnt geben die elektrischen Parameter die J - U -Charakteristik aktueller Perowskit-Solarzellen mit einer festen Schichtdicke wieder. Der maximale Wirkungsgrad wird mit der Architektur (ii) auf Basis von texturiertem c-Si an der Vorder- und Rückseite erreicht und liegt bei $\eta = 31.6\%$, bei einer relativen Steigerung von 31% im Vergleich zu η der Si-Solarzelle. Die Architektur (i) basierend auf planarem c-Si erreicht $\eta = 28.1\%$ mit einer relativen Steigerung von 16%, und Architektur (iii) mit rückseitig texturiertem c-Si erreicht $\eta = 30.4\%$. Die berechnete optimale Schichtdicke des Perowskits für eine planare Architektur (i), $d = 340$ nm, ist erheblich kleiner als für die Architekturen (ii) und (iii), jeweils $d = 570$ nm und $d = 550$ nm. Durch das vergleichsweise geringe absorbierte Licht im c-Si bei der Architektur (i) Planar aufgrund der unvollständigen Lichtabsorption im Infrarot-Bereich wird die Schichtdicke des Perowskits kleiner, um die Ströme anzugleichen. Die Texturen in den Architekturen (ii) und

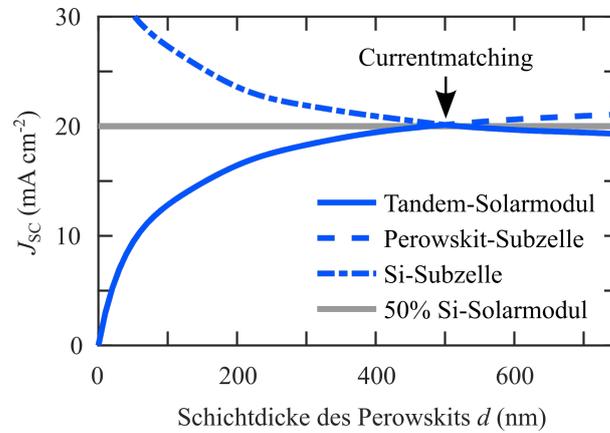


Abbildung 4.6: Verhalten der J_{SC} eines Perowskit/Si 2T Solarmoduls mit beideseitig texturiertem c-Si in Abhängigkeit der Perowskit-Schichtdicke zur Veranschaulichung des Currentmatchings. Currentmatching wird bei der Schichtdicke erreicht, bei der die J_{SC} von Perowskit- und Si-Subzelle gleich sind. Zum Vergleich mit dem Referenzbauteil ist die Hälfte der J_{SC} des Si-Solarmoduls aufgeführt. Entnommen aus [91].

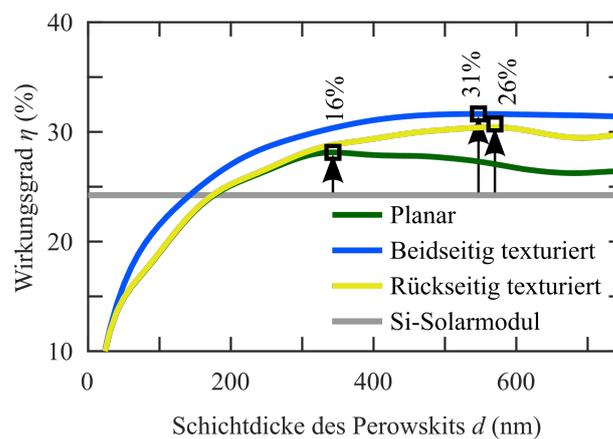


Abbildung 4.7: Darstellung von η in Abhängigkeit der Perowskit-Schichtdicke für die drei Architekturen sowie für das Si-Solarmodul als Referenz. Die relative Steigerung von η im Vergleich zum Referenzbauteil ist jeweils bei der optimalen Schichtdicke eingetragen. Entnommen aus [91].

(iii) sorgen durch Light-Trapping und verbesserte Lichteinkopplung für eine höhere Absorption im c-Si und Currentmatching wird bei einem deutlich dickeren Perowskit erreicht. Die Ergebnisse in Abbildung 4.7 demonstrieren die Notwendigkeit von Currentmatching, um leistungsfähige Perowskit/Si 2T Solarzellen zu erhalten.

4.3 Energieertrag verschiedener Architekturen

Über die Berechnung des Wirkungsgrads unter STC hinaus dient der EY zur Beurteilung der diskutierten Solarzellen unter realistischen Einstrahlungsbedingungen. Hierzu zählen die zeitliche Änderung des Einstrahlungswinkels sowie der Intensität und des Spektrums der Strahlung. Beispiele sind zum einen das Verhältnis von direkter und diffuser Strahlung, das je nach Ort variiert und von der klimatischen Zone beeinflusst wird. Zum anderen werden der saisonale Verlauf sowie der Tagesverlauf der Sonnenposition berücksichtigt. Änderungen im Spektrum entstehen z.B. im Tagesverlauf durch den unterschiedlichen Anteil von direkter und diffuser Strahlung, was zu einer Blauverschiebung der gesamten Strahlung am Morgen und Abend führt.

In diesem Kapitel werden die Auswirkungen auf den EY und das Design der Tandem-Solarzellen untersucht. Zuerst wird der Einfluss der Textur auf die Performance untersucht und die Ergebnisse der Perowskit/Si 2T Solarmodule mit denen unter STC verglichen. Es folgt der Vergleich der Architekturen für verschiedene Orte in den USA bei optimiertem Neigungswinkel des Moduls. Durch Variation des Neigungswinkels wird der EY hinsichtlich der Einstrahlungsrichtung untersucht. Schließlich werden die Auswirkungen der Perowskit-Bandlücke auf die verschiedenen Architekturen analysiert. Anhand der Berechnungen wird gezeigt, dass die Simulation des EY eine präzise Bewertung von Solarzellen unter realen Einflüssen ermöglicht.

4.3.1 Einfluss der Silizium-Textur

Mit der Simulation des EY wird nun der Gesamteinfluss aller oben erwähnten Aspekte der Strahlung auf die verschiedenen Architekturen untersucht. Der Einfluss von Textur auf den EY der Perowskit/Si 2T Solarmodule wird durch den Vergleich der Architekturen deutlich. Aufgrund der entscheidenden Bedeutung des Currentmatchings werden die Perowskit/Si 2T Solarmodule hinsichtlich EY durch Anpassen der Perowskit-Schichtdicke optimiert. Der EY für die drei untersuchten Architekturen ist in Abbildung 4.8 als Funktion der Schichtdicke gezeigt. Zum Vergleich mit den Ergebnissen unter STC wurde erneut die Perowskit-Bandlücke von 1.72 eV verwendet. Für die Berechnung des EY wurde hier der Ort Daggett in Kalifornien gewählt. Das Klima des Ortes ist nach Köppen-Geiger Klassifizierung heißes Wüstenklima [96] mit einem hohen direkten Anteil der Strahlung und einem geringen diffusen Anteil. Architektur (i) mit planarem Schichtaufbau erzielt einen maximalen EY von $622 \text{ kW h m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ und somit eine relative Steigerung des EY von 12% im Vergleich zum Si-Solarmodul ($\text{EY} = 554 \text{ kW h m}^{-2} \text{ a}^{-1}$). Der maximale EY der Architektur (iii) mit Textur an der Rückseite des c-Si beträgt $662 \text{ kW h m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ mit einer relativen Steigerung von 20%. Architektur (ii) mit beidseitig texturiertem c-Si erreicht aufgrund der effizienten Lichteinkopplung im gesamten optischen Spektrum den höchsten EY von $696 \text{ kW h m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ bei einer relativen Steigerung von 26%. Hinsichtlich des verwendeten Texturtyps des c-Si wurden keine bedeutenden Unterschiede festgestellt. Der Austausch der untersuchten Typen random upright, regular upright und regular inverted (siehe Kapitel 2.2.2) hat

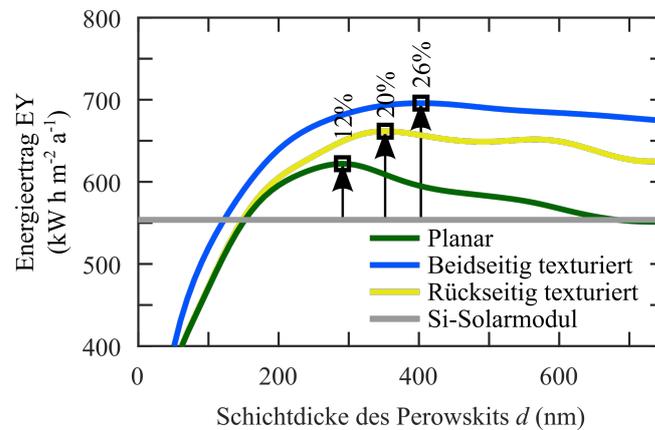


Abbildung 4.8: EY als Funktion der Perowskit-Schichtdicke für die drei untersuchten Architekturen der Perowskit/Si 2T Solarmodule sowie für das Si-Solarmodul als Referenz. Der EY wurde für den Ort Daggett (Kalifornien) berechnet. Die maximale relative Steigerung des EY ist für jede Architektur an der optimalen Schichtdicke eingetragen.

einen vernachlässigbaren Einfluss ($<0.1\%$) auf den berechneten EY. Auf die winkelabhängige Absorption der Strahlung wird in Kapitel 4.3.3 genauer eingegangen.

Ein bemerkenswertes Ergebnis ist die allgemein geringere Perowskit-Schichtdicke für maximalen EY im Vergleich zur optimalen Schichtdicke unter STC. Besonders deutlich ist der Unterschied für die Architekturen (ii) und (iii) mit texturiertem c-Si. Unter STC liegt beispielsweise die optimale Perowskit-Schichtdicke für ein Perowskit/Si 2T Solarmodul mit (ii) beidseitig texturiertem c-Si bei $d = 570$ nm. Unter realistischen Einstrahlungsbedingungen am Ort Daggett (Kalifornien) liegt die ideale Schichtdicke jedoch bei $d = 400$ nm. Weiter unterscheidet sich die ideale Schichtdicke für verschiedene Orte aufgrund unterschiedlicher Spektren der Strahlung. Zur Erklärung dieses Zusammenhangs wird im Folgenden auf die mittlere Photonenergie (APE, engl. average photon energy) des Spektrums eingegangen. Dabei wird die APE eines Ortes anhand des über die Zeit gemittelten Spektrums der Einstrahlung bestimmt. Bei der Bestimmung der APE werden der direkte und der diffuse Anteil berücksichtigt. Der Einfluss der APE auf das Design von Perowskit/Cu(In,Ga)Se₂ 2T Solarmodulen wurde bereits detailliert in dieser Arbeitsgruppe untersucht und von Langenhorst *et al.* veröffentlicht [97]. Der Zusammenhang zwischen der APE und der Schichtdicke des Perowskits in Perowskit/Cu(In,Ga)Se₂ 2T Solarmodulen kann auf das Tandem Perowskit und Si übertragen werden. Bei einer geringen APE wird die optimale Perowskit-Schichtdicke groß. Denn in diesem Fall werden vergleichsweise mehr Photonen im Si mit der geringeren Bandlücke absorbiert und Currentmatching erfolgt bei einem größeren Perowskit. Entsprechend ist die optimale Perowskit-Schichtdicke unter STC mit einer APE von 1.45 eV größer als am Ort Daggett mit einer APE von 1.51 eV.

Wie in diesem Kapitel gezeigt, lässt sich eine Abschätzung des maximalen EY von Perowskit/Si 2T Solarmodulen im Zeitraum eines durchschnittlichen meteorologischen Jahres an diversen Orten in unterschiedlichen klimatischen Zonen machen. Der Vergleich der Architekturen mit einem aktuellen Si-Solarmodul am Ort Daggett demonstriert die relative Steigerung des EY für alle drei untersuchten Architekturen, aber insbesondere für die vielversprechendste Architektur (ii) mit beidseitig texturiertem c-Si. Für eine optimale Leistungsausbeute muss das Design der

Architekturen an das Spektrum der ortstypischen Strahlung angepasst werden. In diesem Kapitel wurde für Perowskit/Si 2T Solarmodule mit der Perowskit-Bandlücke von 1.72 eV gezeigt, dass der Schichtstapel durch die Perowskit-Schichtdicke innerhalb eines Bereichs von 0 bis 750 nm angepasst werden muss, um einen maximalen EY zu erreichen.

4.3.2 Klimazonen

Im nächsten Schritt wird der EY der Perowskit/Si 2T Solarmodule an verschiedenen Orten berechnet, um die Auswirkungen der Strahlung verschiedener klimatischer Zonen auf den EY zu untersuchen. Dazu wird der EY für alle Architekturen an den fünf Orten Daggett (Kalifornien), Miami (Florida), Nashville (Tennessee), Portland (Oregon) und Salt Lake City (Utah) berechnet. Es wird heißes Wüstenklima (Daggett), tropisches Klima (Miami) und gemäßigtes Klima (Nashville, Portland und Salt Lake City) abgedeckt. In Abbildung 4.9 ist der maximale EY für die drei untersuchten Architekturen sowie für das Referenzbauteil aufgeführt. Die dargestellten Ergebnisse zeigen den EY von optimierten Bauteilen hinsichtlich Perowskit-Schichtdicke und Neigungswinkel des Moduls. Zur Vergleichbarkeit mit den bisherigen Ergebnissen wurde erneut eine Perowskit-Bandlücke von 1.72 eV gewählt. Der optimale Neigungswinkel ist vom Ort abhängig und befindet sich im Bereich der geographischen Breite des Ortes. In dieser Arbeit wurde die Untersuchung auf Module mit festem Neigungswinkel beschränkt. Im EY Modell wurde darüber hinaus die einachsige und zweiachsige Nachführung von Solarzellen implementiert. Weitere Details sind in der Veröffentlichung von Schmager *et al.* zu finden [62]. Für Portland wird ein maximaler EY von $423 \text{ kW h m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ mit Architektur (ii) basierend auf beidseitig texturiertem c-Si erreicht. Dieser EY ist geringer als für Daggett ($696 \text{ kW h m}^{-2} \text{ a}^{-1}$), da die Intensität der Strahlung in Portland aufgrund hoher Wolkenbedeckung deutlich geringer ist. Die relative Steigerung im EY im Vergleich zur Referenz ist abhängig vom Ort. Für die planare Architektur (i) liegt die relative Steigerung im Bereich von 12-14%, für die Architektur (ii) mit beidseitig texturiertem c-Si bei 26-28% und für die Architektur (iii) mit rückseitig texturiertem c-Si bei 19-22%. Damit fällt die relative Steigerung des EY im Vergleich zum Si-Solarmodul für alle Architekturen geringer aus als die relative Steigerung von η unter STC (siehe Abbildung 4.8). Die Erklärung liegt in der zeitlichen Änderung des Spektrums und des Einfallswinkels der Strahlung unter realistischen Bedingungen. Aufgrund dessen wird Currentmatching nicht erreicht. Der Mismatch in den Subzellen ist ein Verlust im Tandem-Solarmodul. Beim Si-Solarmodul als Einfach-Solarzelle entstehen diese Verluste nicht. Die Architektur (ii) mit beidseitig texturiertem c-Si erreicht in allen klimatischen Zonen den höchsten EY. Die wesentlichen Unterschiede der Strahlung in verschiedenen Orten liegen sowohl im Spektrum als auch in der Einfallrichtung der direkten Strahlung. Da die Perowskit-Schichtdicke für jeden Ort angepasst wurde, liegt der Grund für die hohe Lichtabsorption der Architektur (ii) nicht an einem Einfluss des Spektrums. Wie bereits erläutert, resultieren aus einer anderen APE (an einem anderen Ort) aufgrund der Anpassung der Schichtdicke keine Verluste. Architektur (ii) zeigt vielmehr eine hohe Lichtabsorption für beliebige Einfallrichtungen der Strahlung, insbesondere am Ort Daggett mit einem hohen direkten Lichtanteil, dessen Einfallrichtung sich aufgrund der Sonnenbewegung ändert. Dieser Zusammenhang wird im folgenden Kapitel genauer betrachtet.

4.3.3 Einfluss des Neigungswinkels

Um bei fest installierten Modulen den EY zu maximieren, wird das Modul im optimalen Winkel über dem Boden angebracht. Der optimale Neigungswinkel liegt im Bereich der geographischen

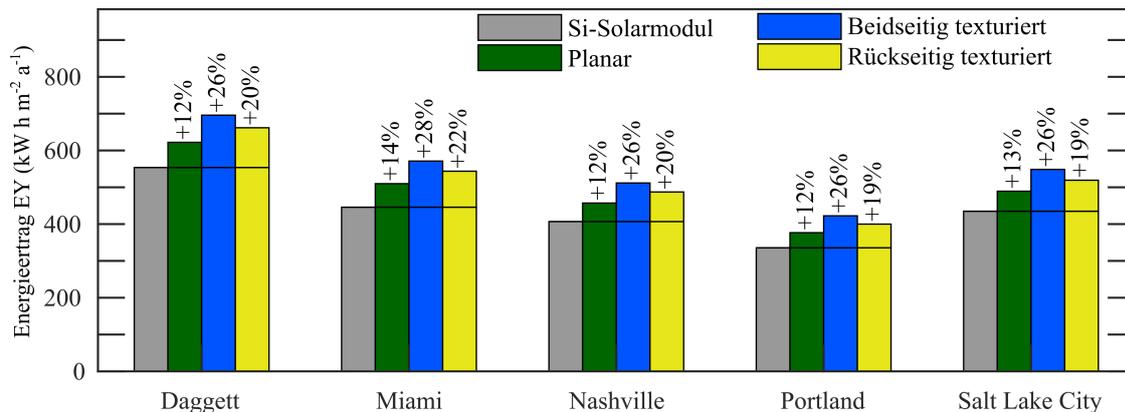


Abbildung 4.9: Maximaler EY der drei untersuchten Perowskit/Si 2T Solarmodule sowie des Si-Solarmoduls an den fünf verschiedenen Orte Daggett, Miami, Nashville, Portland und Salt Lake City. Bei den gezeigten Ergebnissen wurden die Perowskit-Schichtdicke sowie der Neigungswinkel des Moduls optimiert. Für jede Architektur ist die relative Steigerung im EY verglichen mit dem Si-Solarmodul eingetragen. Entnommen aus [91].

Breite des Ortes, da in diesem Fall die Sonne dann senkrecht auf die Solarzelle auftrifft, wenn die Intensität der Strahlung am höchsten ist. Mithilfe der Simulation lässt sich der optimale Neigungswinkel genauer eingrenzen. Ein weiterer interessanter Aspekt ist die Untersuchung der winkelabhängigen Einstrahlung für die verschiedenen Architekturen der Perowskit/Si 2T Solarmodule. In Abbildung 4.10 ist der EY am Ort Daggett als Funktion des Neigungswinkels sowie der Perowskit-Schichtdicke aufgetragen. Die Architektur (i) Planar weist den geringsten EY für alle Winkel auf. Die Architekturen (iii) und (ii) zeigen, dass mit rückseitiger Texturierung und insbesondere mit beidseitiger Texturierung ein höherer EY für einen großen Winkelbereich erreicht wird. Ebenso wird ein höherer EY für einen größeren Bereich der Perowskit-Schichtdicke für die Architekturen mit Textur des c-Si erzielt. Aufgrund der texturierten Oberfläche wird die Reflexion des einfallenden Lichts im gesamten Winkelbereich, insbesondere für flache Einfallswinkel, reduziert und die Lichteinkopplung erhöht.

Anhand der Berechnung des winkelabhängigen EY lässt sich der optimale Neigungswinkel bestimmen sowie der Einfluss von direkter und diffuser Strahlung auf den optimalen Neigungswinkel untersuchen. Hierbei ist eine getrennte Berechnung des EY für den direkten und diffusen Lichtanteil aufschlussreich. Die Abbildung 4.11 zeigt die jeweiligen Anteile des EY in einem planaren Perowskit/Si 2T Solarmodul sowie den gesamten EY als Funktion des Neigungswinkels am Ort Daggett. Aufgrund der hohen direkten Strahlung in Daggett ist der EY für den direkten Anteil im Vergleich zu dem diffusen Anteil ausgeprägter. Zudem wird der diffuse Anteil mit zunehmendem Neigungswinkel des Moduls geringer, da hierbei ein größer werdender Teil der diffusen Strahlung abgeschnitten wird und nicht auf die Vorderseite der Solarzelle auftrifft. Hingegen wird der maximale EY des direkten Anteils unter einer Neigung von 35° erreicht. Dieser Neigungswinkel entspricht der geographischen Breite des Ortes. In diesem Fall trifft die direkte Strahlung zur Tageszeit der maximalen Intensität senkrecht auf die Solarzelle auf. Der optimale Neigungswinkel für den gesamten EY ist jedoch aufgrund des diffusen Anteils verschoben und liegt in diesem Fallbeispiel bei 25°.

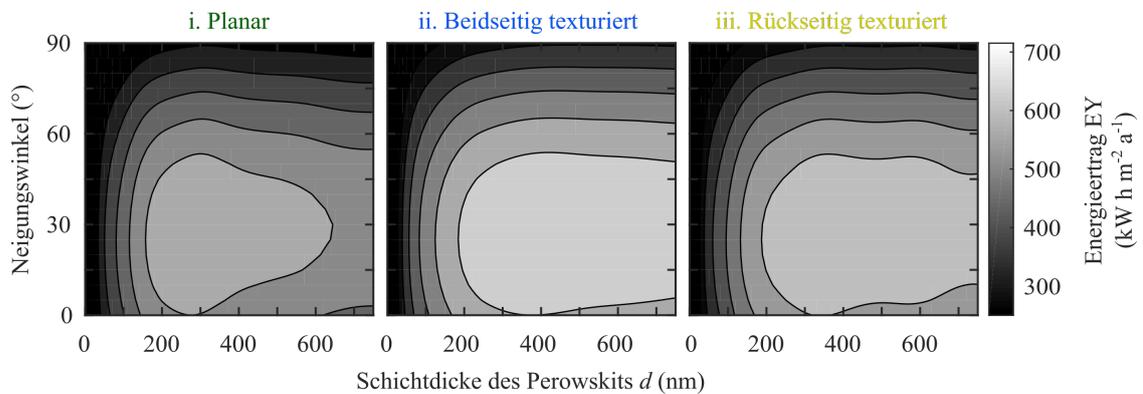


Abbildung 4.10: Darstellung des EY für die drei Architekturen der Perowskit/Si 2T Solarmodule in Abhängigkeit des Neigungswinkels sowie der Schichtdicke des Perowskits. Der EY ist am Ort Daggett und bei einer Modulneigung von 0-90° in Südausrichtung gezeigt. Entnommen aus [91].

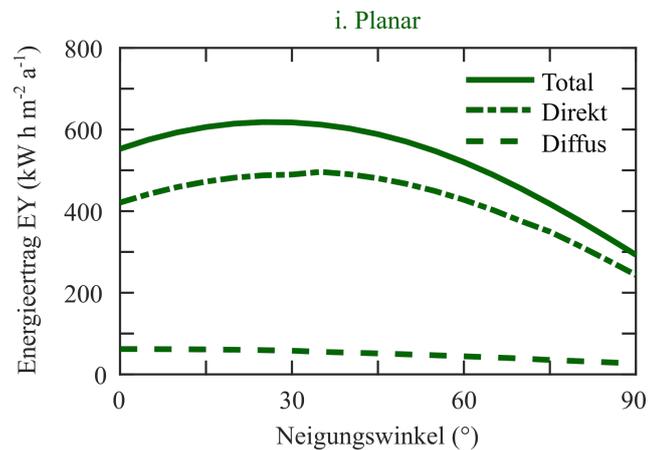


Abbildung 4.11: Winkelabhängiger EY für die Architektur (i) Planar mit Neigung des Moduls in Südausrichtung. Neben dem gesamten EY ist der imaginäre EY für die Fälle nur direkte bzw. nur diffuse Einstrahlung dargestellt.

Die Untersuchung des EY in Abhängigkeit des Neigungswinkels zeigt die verbesserte Licht-einkopplung für Perowskit/Si 2T Solarmodule mit texturiertem c-Si. Die Architektur (ii) mit beidseitig texturiertem c-Si weist im Vergleich zu den anderen Architekturen eine Robustheit gegenüber dem Einfallswinkel der Strahlung auf. Darüber hinaus erreicht diese Architektur den höchsten EY für ein breites Intervall der Schichtdicke, was sie am geeignetsten für den Einsatz an verschiedenen Orten mit unterschiedlichen klimatischen Bedingungen macht.

4.3.4 Optimierung der Perowskit-Bandlücke

Die Analyse des EY von Perowskit/Si 2T Solarmodulen für verschiedene Bandlücken des Perowskits birgt weiteres Potential in der Leistungssteigerung der Tandem-Solarzellen. Denn wie der Vergleich der Performance unter STC (Abbildung 4.7) und unter realistischen Bedingungen (Abbildung 4.8) zeigt, hat das Spektrum des eingestrahlten Lichts einen Einfluss auf das optimale Design von Perowskit/Si 2T Solarmodulen. Die Perowskit-Schichtdicke für Currentmatching ändert sich mit dem Spektrum der Strahlung. Dabei verhält sich die optimale Schichtdicke des Perowskit-Absorbers reziprok zur APE des Spektrums. Im Folgenden wird untersucht, ob eine Anpassung der Perowskit-Bandlücke an die höhere APE in realistischen Spektren im Vergleich zum AM1.5g Spektrum (STC) zu einer Steigerung des EY führen kann. Die Schichtdicke des Perowskits wird dabei für jede Bandlücke hinsichtlich Currentmatching angepasst.

Der EY der Perowskit/Si 2T Solarmodule wird für die fünf Perowskit-Bandlücken 1.55 eV, 1.66 eV, 1.72 eV, 1.80 eV und 1.88 eV untersucht. Die elektrischen Parameter der entsprechenden Perowskit-Solarzellen sind in Tabelle 4.1 in Kapitel 4.2.2 über elektrische Kenngrößen aufgeführt. Zur Bestimmung des maximalen EY wird eine Optimierung der Schichtdicke für alle Architekturen durchgeführt. Abbildung 4.12 zeigt den EY der Architektur (i) Planar als Funktion der Schichtdicke für alle Bandlücken. Als Referenz ist der EY eines Si-Solarmoduls mit planarem c-Si eingetragen. Die jeweilige Schichtdicke am Punkt für maximalen EY ist hervorgehoben. Die optimale Schichtdicke steigt mit zunehmender Bandlücke. Umso größer die Perowskit-Bandlücke ist, umso kleiner ist der spektrale Anteil, der im Perowskit absorbiert wird. Entsprechend erfolgt das Currentmatching bei einem dickeren Perowskit. Die optimale Schichtdicke für einen Perowskit mit Bandlücke von 1.88 eV überschreitet den Bereich der simulierten Schichtdicke von 0-750 nm (siehe Abbildung 4.12). Da die Perowskit-Schichtdicke in Perowskit-Solarzellen zuvor deutlich unter 750 nm lag [90, 95, 98], wurde dieser Bereich für die Berechnung festgelegt. In diesem Fall ist der Perowskit zu klein um genügend Licht für Currentmatching zu absorbieren und der Strom im Tandem-Solarmodul ist limitiert durch die Perowskit-Solarzelle. Ein bemerkenswertes Ergebnis ist, dass die optimale Bandlücke des Perowskits anders als unter STC im Bereich von 1.80 eV liegt. Die höhere optimale Bandlücke unter realistischen Bedingungen lässt sich durch die erhöhte APE des Einstrahlungsspektrums im Vergleich zum AM1.5g Spektrum erklären. Die optimale Bandlücke wird entsprechend unter realistischen Bedingungen größer.

Für ein Perowskit/Si 2T Solarmodul mit (ii) beidseitig texturiertem c-Si (siehe Abbildung 4.13) ist die optimale Schichtdicke aufgrund der höheren Lichtabsorption im c-Si größer als bei der Architektur (i) Planar (siehe Abbildung 4.12). Der Vergleich dieser Architekturen zeigt weiter, dass für die Bandlücken ≤ 1.72 eV die Architektur (ii) über ein größeres Intervall der Schichtdicke hinweg einen hohen EY aufweist und somit robuster gegenüber einer Änderung der Schichtdicke ist. Diese Robustheit zeigt Architektur (ii) für alle untersuchten Orte, wie anhand des berechneten EY als Funktion der Perowskit-Schichtdicke bei einer Bandlücke von 1.72 eV in Abbildung 4.14

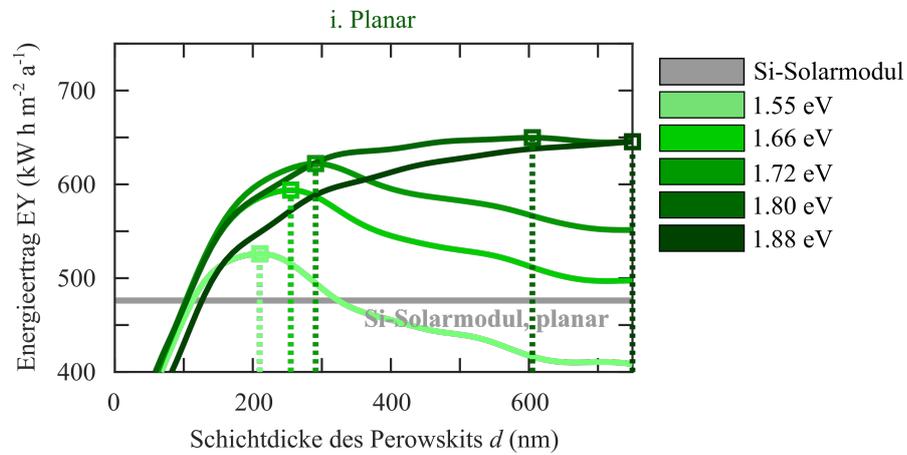


Abbildung 4.12: Berechneter EY für die Architektur (i) mit planarem c-Si in Abhängigkeit der Schichtdicke für verschiedene Bandlücken des Perowskits. Zusätzlich ist der EY eines Si-Solarmoduls basierend auf planarem c-Si aufgeführt. Für jede Bandlücke ist die optimale Schichtdicke des Perowskits gekennzeichnet. Entnommen aus [91].

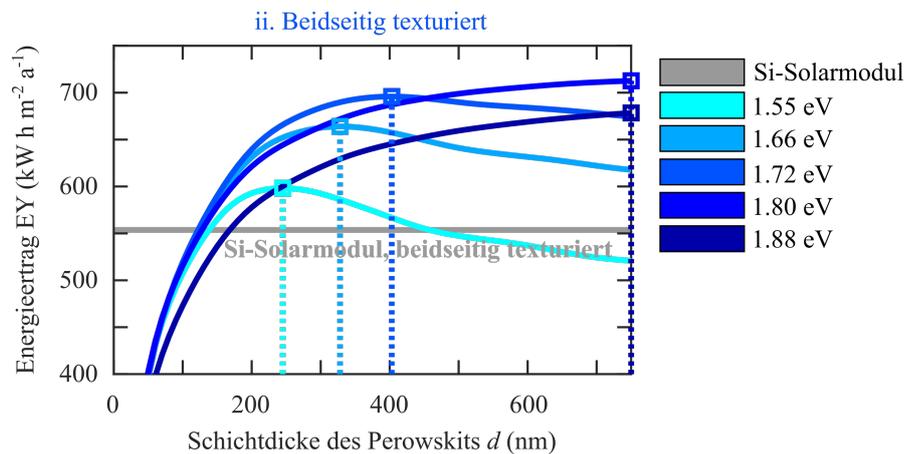


Abbildung 4.13: EY für die Architektur (ii) mit beidseitig texturiertem c-Si als Funktion der Schichtdicke. Als Referenz ist der EY des Si-Solarmoduls mit derselben Textur eingetragen. Die jeweilige optimale Schichtdicke ist für jede Bandlücke hervorgehoben. Entnommen aus [91].

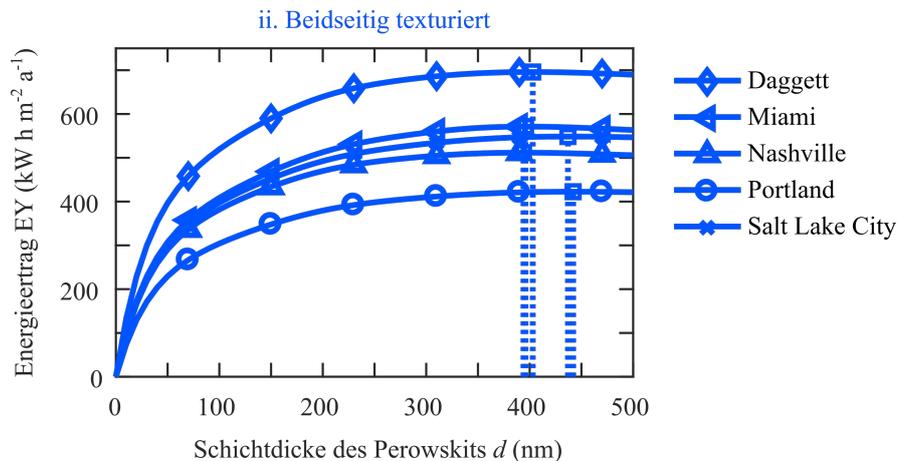


Abbildung 4.14: Darstellung des EY für die Orte Daggett, Miami, Nashville, Portland und Salt Lake City. Der EY ist für die Architektur (ii) mit beidseitig texturiertem c-Si und einer Perowskit-Bandlücke von 1.72 eV gezeigt. Die optimale Schichtdicke des Perowskits ist für jeden Ort gekennzeichnet. Entnommen aus [91].

nachvollzogen werden kann. Zudem liegt die berechnete Schichtdicke für maximalen EY für alle Orte in einem vergleichbaren Bereich zwischen 390 und 430 nm. Das korreliert mit dem kleinen Intervall, in dessen Bereich von 1.49 bis 1.52 eV die APE für diese Orte liegt. Die Werte der hier diskutierten APE für diese und weitere Orte sind in Langenhorst *et al.* zu finden [97].

Für den direkten Vergleich aller untersuchten Architekturen wurde der maximale EY am Ort Daggett zu jeder Perowskit-Bandlücke berechnet. Abbildung 4.15 zeigt jeweils den maximalen EY für die Perowskit/Si 2T Solarmodule sowie den EY für drei Referenzbauteile jeweils bestehend aus einem planaren c-Si, einem beidseitig texturierten c-Si und einem rückseitig texturierten c-Si. Die optimale Bandlücke des Perowskits liegt für alle Architekturen im Bereich von 1.8 eV. Demnach können signifikante Einflüsse der c-Si-Textur wie eine unterschiedliche spektrale Transmission oder Reflexion des Lichts auf die Lichtabsorption in der Tandem-Solarzelle ausgeschlossen werden. Entsprechend hat die erhöhte Absorption im Infrarot durch Light-Trapping keine bedeutende Auswirkung auf die optimale Bandlücke des Perowskits. In Abbildung 4.16 wird weiter demonstriert, dass auch die Klimazone der jeweiligen Orte keinen bemerkenswerten Einfluss auf die optimale Bandlücke hat. Der maximale EY wird für alle Orte innerhalb der Klimazonen heißes Wüstenklima, tropisches Klima und gemäßigtes Klima bei der Bandlücke des Perowskits von 1.8 eV erzielt.

Die Analyse des EY für verschiedene Bandlücken des Perowskits zeigt, dass die Architektur (ii) basierend auf beidseitig texturiertem c-Si neben der größten Leistungsausbeute auch für alle untersuchten Bandlücken den höchstmöglichen EY über ein großes Intervall der Perowskit-Schichtdicke hinweg aufweist. Aufgrund dieser Vorteile gegenüber den anderen Architekturen stellt sich diese Architektur hinsichtlich Ertrag am geeignetsten dar. Wie der Vergleich der Ergebnisse unter STC und unter realistischen Bedingungen zeigt, ist allerdings die optimale Schichtdicke für die Architektur (ii) verschieden. So wird der maximale Wirkungsgrad η für ein Perowskit/Si 2T Solarmodul der Architektur (ii) mit Bandlücke 1.72 eV bei einer Perowskit-Schichtdicke von ca. 550 nm erreicht (siehe Abbildung 4.7), jedoch der maximale EY bei einer Schichtdicke im Bereich von

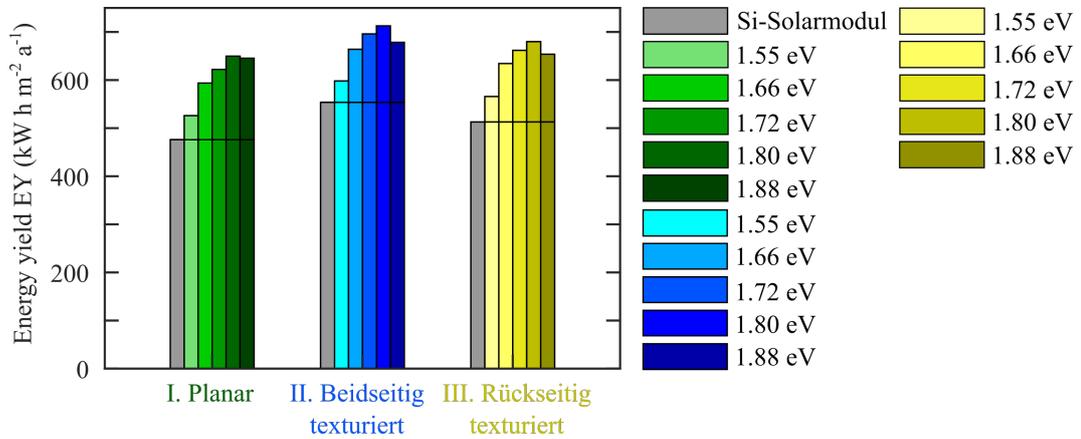


Abbildung 4.15: Maximaler EY für die drei untersuchten Architekturen am Ort Daggett. Gezeigt wird jeweils der EY mit optimierter Schichtdicke des Perowskits und optimiertem Neigungswinkel des Moduls. Entnommen aus [91].

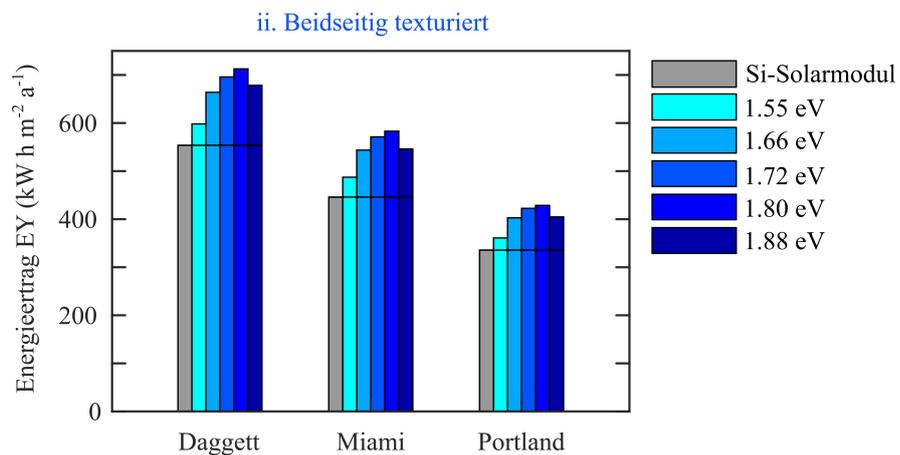


Abbildung 4.16: Vergleich des maximalen EY für Orte in verschiedenen klimatischen Zonen mit optimierter Perowskit-Schichtdicke und optimierten Neigungswinkel des Moduls. Entnommen aus [91].

390-430 nm (siehe Abbildung 4.14). Demzufolge führte ein unter STC optimiertes Solarmodul zu einem geringeren EY aufgrund von Verlusten durch Currentmismatch und das Bauteil wäre nicht für den maximalen EY unter realistischer Einstrahlung ausgelegt.

Die optimale Bandlücke des Perowskits liegt für alle drei Architekturen bei ca. 1.8 eV und weicht damit von der optimalen Bandlücke unter STC ab. Nach dem Messstandard für Solarzellen unter AM1.5g Spektrum und senkrechter Lichteinstrahlung wird der höchste Wirkungsgrad hingegen bei einer Bandlücke des Perowskits im Bereich von 1.7 eV erreicht. Demzufolge sind die Ergebnisse aus der Modellierung des EY bedeutend für das Design von Perowskit/Si 2T Solarmodulen, um größtmöglichen Ertrag unter realen Bedingungen zu ermöglichen. Die Ergebnisse der idealen Perowskit-Bandlücke stimmen zudem mit der Theorie von De Vos zum Detailed balance limit in Tandem-Solarzellen überein [31]. Wesentliche optische Einflüsse der Architektur sowie Einflüsse durch die spezifische Strahlung an verschiedenen Orten auf die optimale Bandlücke des Perowskits wurden nicht gefunden.

Die Architekturen der Perowskit/Si 2T Solarmodule versprechen sowohl in Laborbedingungen mit senkrechtem Lichteinfall als auch unter realistischen Bedingungen mit zeit- und winkelabhängigem Lichteinfall eine höhere Performance als aktuelle Si-Solarmodule. Mit der optimalen Perowskit-Bandlücke von 1.80 eV erreicht die Architektur (i) basierend auf planarem c-Si trotz erhöhter Reflexionsverluste an der flachen Vorder- und Rückseite eine relative Steigerung des EY von 17% (Ort Daggett) im Vergleich zu einem Si-Solarmodul mit texturierter Vorder- und Rückseite. Weiter verspricht schon das Einbringen von Textur unter dem geringstmöglichen Aufwand eine relative Steigerung des EY von 23% bei optimaler Perowskit-Bandlücke. Die Herstellung von Perowskit/Si Tandem-Solarmodulen mit der Architektur (iii) basierend auf planarer Vorder- und texturierter Rückseite birgt im Vergleich zu Architektur (ii) den Vorteil, dass die Perowskit-Solarzelle durch eine kostengünstige flüssig-basierte Herstellung auf einer flachen Unterseite aufgebracht werden kann. Demnach könnte auch Architektur (iii) wirtschaftlich interessant sein aufgrund des erhöhten EY im Vergleich zu Architektur (i). Der berechnete EY für die Architektur (ii) mit beidseitig texturiertem c-Si am Ort Daggett erzielt die größte relative Steigerung von 29%. Diese Architektur ist damit die attraktivste denkbare Architektur für Perowskit/Si Tandem-Solarzellen auf Basis von aktuellen hochleistungsfähigen Si-Solarzellen.

4.4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel wurde der Ertrag von Perowskit/Si Solarmodulen mit einer 2T-Verschaltung anhand der Modellierung des EY analysiert. Dabei wurden die drei Architekturen basierend auf (i) planarem c-Si, (ii) beidseitig texturiertem c-Si und (iii) rückseitig texturiertem c-Si gegenüber gestellt. Als Referenz wurde ein Si-Solarmodul basierend auf einer aktuellen IBC-Solarzelle verwendet. Während die Architektur (ii) den größten Ertrag liefert, bietet Architektur (iii) einen Kompromiss zwischen erhöhter Leistungsfähigkeit und kostengünstiger Herstellung.

Zuerst wurde eine Berechnung des Wirkungsgrads unter STC durchgeführt, um die Ergebnisse des Modells zu validieren und die Bauteile zu analysieren. Dabei wurden die elektrischen Parameter der Solarzellen demonstriert, die zur Modellierung der Solarzellen mit dem Eindiodenmodell verwendet wurden. Anschließend wurde der Einfluss von pyramidenförmigen Texturen mit einer Strukturgröße von wenigen Mikrometern auf die Lichtabsorption durch eine optische Analyse der Architekturen untersucht. Es wurde festgestellt, dass gegenüber einer planaren Architektur (i) eine rückseitige Textur wie in Architektur (iii) die Lichtabsorption im Infrarot durch

Light-Trapping im c-Si erhöht und eine Textur an der Vorderseite wie in Architektur (ii) die Lichteinkopplung im gesamten Spektralbereich durch Verringern der Reflexionsverluste verbessert. Durch Schichtdicken-Optimierung des Perowskits wurde die Bedeutung von Currentmatching für die 2T-Verschaltung demonstriert und es wurde ein maximaler Wirkungsgrad von 32% unter Verwendung der Architektur (ii) gefunden.

Zum Vergleich wurden im nächsten Schritt realistische Bedingungen simuliert, indem der EY auf Basis von Wetterdaten über ein typisch meteorologisches Jahr hinweg berechnet wurde. Für den Vergleich wurde zunächst für alle Architekturen dieselbe Perowskit-Bandlücke von 1.72 eV wie unter STC verwendet. Es stellte sich heraus, dass die optimale Schichtdicke des Perowskits signifikant von der optimalen Schichtdicke unter STC abweicht. Das unterstreicht die Notwendigkeit für die Anpassung des Schichtstapels eines Perowskit/Si 2T Solarmoduls an die reale Lichteinstrahlung um eine optimale Leistungsausbeute zu erzielen. Der EY wurde für fünf Orte in verschiedenen Klimazonen analysiert. Dabei wurde eine geringere relative Steigerung des EY für Perowskit/Si 2T Solarmodule im Vergleich zum Si-Solarmodul festgestellt als unter STC. Die relative Steigerung des EY liegt für Architektur (ii) mit beidseitig texturiertem c-Si bei 26-28% und unter STC bei 31%. Die Verluste unter realistischen Bedingungen mit zeitabhängiger und winkelabhängiger Einstrahlung sind auf Currentmismatch zurückzuführen. Es wurde zudem der Einfluss des Neigungswinkels untersucht und zusätzlich das Verhalten des EY gegenüber einer Änderung der Perowskit-Schichtdicke. Dabei zeigte Architektur (ii) mit beidseitig texturiertem c-Si sowohl über einen großen Bereich des Neigungswinkels als auch der Schichtdicke hinweg den höchsten EY. Die entscheidende Robustheit gegenüber winkelabhängiger Einstrahlung resultiert aus der hohen Lichteinkopplung an der Textur auch für flache Einfallswinkel.

Anschließend wurde die Bandlücke des Perowskits optimiert, um den EY unter realistischer Strahlung zu maximieren, deren Spektrum sich von dem standardisierten AM1.5g Spektrum unterscheidet. Dabei wurde die Bandlücke im Bereich von 1.55-1.88 eV variiert und für jede Bandlücke eine Optimierung der Schichtdicke durchgeführt. Die Optimierung erfolgte zunächst am Ort Daggett. Die optimale Schichtdicke des Perowskits steigt mit zunehmender Bandlücke für Solarmodule mit 2T-Verschaltung, da der spektrale Bereich der Lichtabsorption im Perowskit schmaler wird und genügend Lichtabsorption für Currentmatching nur durch einen dickeren Perowskit erreicht werden kann. Der maximale EY am Ort Daggett wurde bei der Bandlücke 1.8 eV gefunden.

Der Einfluss der Perowskit-Bandlücke auf den EY wurde weiter für verschiedene Klimazonen sowie für die drei Architekturen der Perowskit/Si 2T Solarmodule untersucht. Dabei wurde die optimale Bandlücke von 1.8 eV für die untersuchten Orte Daggett (heißes Wüstenklima), Miami (tropisches Klima) und Portland (gemäßigtes Klima) gefunden. Ein signifikanter Einfluss der ortsabhängigen Strahlung wurde nicht festgestellt. Typische Änderungen der APE, der Einstrahlungswinkel und der Intensität der Strahlung zeigen also im Rahmen der Untersuchung keinen bemerkenswerten Einfluss auf die optimale Bandlücke. Auch die Textur zeigt im Vergleich der Architekturen keinen erheblichen Einfluss auf die optimale Perowskit-Bandlücke. Die Optimierung der Bandlücke hat am Beispiel von Daggett zu einer Erhöhung der relativen Steigerung des EY auf 29% für die Architektur (ii) im Vergleich zum Referenzbauteil geführt.

Auf Basis der Ergebnisse kann geschlussfolgert werden, dass Architektur (ii) mit beidseitig texturiertem c-Si am vielversprechendsten für den Einsatz von Perowskit/Si 2T Solarmodulen ist. Diese Architektur weist einen sehr hohen EY über einen großen Bereich des Einfallswinkels sowie über die Perowskit-Schichtdicke hinweg auf. Für Bauteile mit dieser Architektur ist demnach

eine spezielle Anpassung des Schichtstapels an die ortsabhängige Lichteinstrahlung weniger bedeutend. Dennoch weicht die optimale Schichtdicke unter realistischen Bedingungen von der optimalen Schichtdicke unter STC ab. Das muss beim Design der Perowskit/Si 2T Solarmodule berücksichtigt werden, um den maximalen Ertrag zu erzielen.

Der Nachteil von Architektur (ii) gegenüber den anderen Architekturen liegt in der Schwierigkeit, die Perowskit-Solarzelle unter Bewahrung ihrer herausragenden elektrischen Eigenschaften auf der texturierten Si-Oberfläche aufzubringen. Aufgrund der erheblich größeren Oberfläche der Textur müssen Rekombinationsverluste an der Grenzfläche vermieden werden. Nach aktuellem Stand müssen bei der Umsetzung dieser Architektur noch technologische Probleme gelöst werden, um den Wirkungsgrad weiter zu steigern [92, 99, 94]. Die Architektur (iii) mit rückseitig texturiertem c-Si kann auch in Betracht gezogen werden, da diese Architektur einen relativ hohen EY aufweist und aufgrund der planaren Oberfläche einfacher und kostengünstiger in der Herstellung qualitativ hochwertiger Perowskit-Solarzellen ist. Analog zur Architektur (ii) werden mit Architektur (iii) bereits hohe Wirkungsgrade im Labor erzielt und es wird von weiterem Potential unter Verbesserung der Qualität der Perowskit-Solarzelle berichtet [93].

In Hinblick auf die künftige Entwicklung der Perowskit/Si Tandem-Solarzellen kann auf Grundlage der vorliegenden Ergebnisse geschlossen werden, dass die Architektur (ii) mit beidseitig texturiertem c-Si von den in diesem Kapitel untersuchten Architekturen den theoretisch größtmöglichen EY verspricht. Aufgrund der Textur an der Vorderseite des c-Si und damit der Perowskit-Dünnschicht-Solarzelle weist diese Architektur gegenüber den Architekturen mit planarer Vorderseite des c-Si die beste Lichteinkopplung auf. Bei den anderen Architekturen hingegen sind die Reflexionsverluste an der flachen Vorderseite höher.

Es wurden bereits weitere Architekturen der Perowskit/Si 2T Solarzellen im Labor getestet. Eine Analyse dieser Architekturen hinsichtlich des EY unter realistischen Bedingungen mit dem vorliegenden Simulationsmodell könnte weiteren Aufschluss über deren Potential liefern. Eine dieser Architekturen ist die Erweiterung der Architektur (iii) mit flacher Vorderseite und texturierter Rückseite des c-Si um eine texturierte Folie an der Vorderseite. Dabei ist die Folie an der Oberseite mit dem Profil einer pyramidenförmigen c-Si-Textur strukturiert, um die Lichteinkopplung zu erhöhen. Diese Architektur wurde bereits von Jost *et al.* verwirklicht [57]. Eine weitere Architektur wurde basierend auf c-Si mit beidseitiger Textur realisiert, die eine flache Vorderseite des Perowskits aufweist. Hierbei wird die Perowskit-Solarzelle aus dickem Perowskit hergestellt, der die Täler der pyramidenförmigen c-Si-Textur vollständig ausfüllt [100, 101]. Zudem können mittlerweile dicke Perowskite mit einer Schichtdicke von 1.5 μm mittels ink-jet printing hergestellt werden und damit Perowskit-Solarzellen mit einem Wirkungsgrad von 18% realisiert werden [6]. Damit könnte auch die Integration kostengünstiger gedruckter Perowskite in die Architekturen von Perowskit/Si 2T Solarmodulen ermöglicht werden. Mittels Simulationen des EY könnte sich auf einfache Weise das Potential dieser Architekturen sowie weiterer denkbarer Modifikationen abschätzen lassen.

Mit dem vorliegenden Simulationsmodell lassen sich auch Perowskit/Si Tandem-Solarzellen mit 4T-Verschaltung evaluieren [102]. Auf der einen Seite ist bei Architekturen auf Basis der 4T-Verschaltung mit erhöhten optischen Verlusten durch parasitäre Absorption in den zusätzlichen elektrischen Kontakten zu rechnen. Auf der anderen Seite entstehen für diese Verschaltung keine Verluste durch Currentmismatch wegen der sich zeitlich ändernden Einstrahlung wie bei der 2T-Verschaltung. Die Simulation des EY stellt hier ein Mittel zur Abwägung der Vor- und Nachteile beider Verschaltungen für verschiedene künftig denkbare Architekturen bereit.

Architekturen mit einer 3T-Verschaltung stellen eine weitere Möglichkeit in Aussicht, die Limitierung der Architekturen mit 2T-Verschaltung unter realistischen Bedingungen durch Currentmismatch zu überwinden [103]. Der Vorteil der 3T-Verschaltung gegenüber der 4T-Verschaltung ist die reduzierte parasitäre Absorption aufgrund der geringeren Anzahl an elektrischen Kontakten im Schichtstapel im Vergleich zur Tandem-Solarzelle mit 4T-Verschaltung. Hierbei kann die Untersuchung mit dem EY Modell eine quantitative Analyse der verschiedenen Verluste ermöglichen, um Schlüsse über den Nutzen der 3T-Verschaltung zu ziehen.

5 Energieertrag von bifazialen Solarmodulen

Bei bifazialen Solarmodulen wird Strahlung zusätzlich zur Vorderseite an der transparenten Rückseite eingekoppelt. Auf diese Weise kann bei gleich bleibendem Wirkungsgrad unter STC der Ertrag der Solarmodule gesteigert werden [8, 104]. Diese Methode kann sowohl bei Einfach-Solarzellen angewendet werden [105, 106] als auch bei Tandem-Solarzellen [107]. Die Herstellung der in dieser Arbeit untersuchten Einfach- und Tandem-Solarmodule basiert auf Si-Wafern. Der in der Regel metallische Rückkontakt an der Si-Solarzelle wird dabei durch ein TCO ersetzt und der Strom wird über Metallfinger abgeführt. In diesem Kapitel wird der EY verschiedener bifazialer Perowskit/Si Tandem-Solarmodule unter dem Einfluss von Albedo-Strahlung untersucht. Hierzu werden einige Untergründe mit verschiedenen Reflexionsspektren verwendet. Zuerst wird eine getrennte Analyse der Lichtabsorption unter Beleuchtung an der Vorderseite und an der Rückseite verschiedener Solarmodule durchgeführt, um den Mechanismus der Stromerzeugung für direkte und diffuse Strahlung sowie Albedo-Strahlung in einer Tandem-Solarzelle zu veranschaulichen. Bei der anschließenden Modellierung des EY wird zunächst der Einfluss von Albedo-Strahlung auf die Optimierung von bifazialen texturierten Perowskit/Si Solarmodulen mit der 2T-Verschaltung untersucht und dabei die Verluste durch Currentmismatch minimiert. Weiter werden Auswirkungen der Albedo-Strahlung verschiedener Untergründe auf die optimale Bandlücke des Perowskits aufgezeigt und diskutiert. Es folgt eine Gegenüberstellung der 2T- und 4T-Verschaltung basierend auf optimierten bifazialen Perowskit/Si Solarmodulen. Diese werden mit einem bifazialen Si-Solarmodul sowie mit monofazialen Solarmodulen (siehe Kapitel 4) verglichen. Schließlich werden Verluste des EY durch Abschattung des Bodens unter Berücksichtigung des Schattenwurfs eines Moduls abgeschätzt.

Die Ergebnisse aus diesem Kapitel wurden im referierten Fachjournal **Solar Energy Materials and Solar Cells**, **208**, **110367**, (2020) veröffentlicht [108]. Die Ergebnisse sind in allen Abbildungen mit Quellennachweis gekennzeichnet.

5.1 Architekturen

5.1.1 Silizium-Solarmodul

Zur Einordnung des berechneten EY der bifazialen Perowskit/Si Tandem-Solarmodule werden diese mit einem monofazialen und einem bifazialen Si-Solarmodul verglichen. Die Referenzbauteile basieren auf der in Kapitel 2.2.2 über Si-Solarzellen vorgestellten HIT-Solarzelle. Diese Solarzelle weist neben einer hohen Effizienz bereits eine transparente Elektrode (TCO) an der Vorder- und Rückseite auf. Für das bifaziale Si-Solarmodul wird der Schichtstapel an beiden Seiten durch die dicken Schichten EVA und Glas sowie durch ein dünnes ARC zur Reduzierung der Reflexionsverluste erweitert. In Abbildung 5.1 wird der schematische Aufbau des bifazialen Si-Solarmoduls

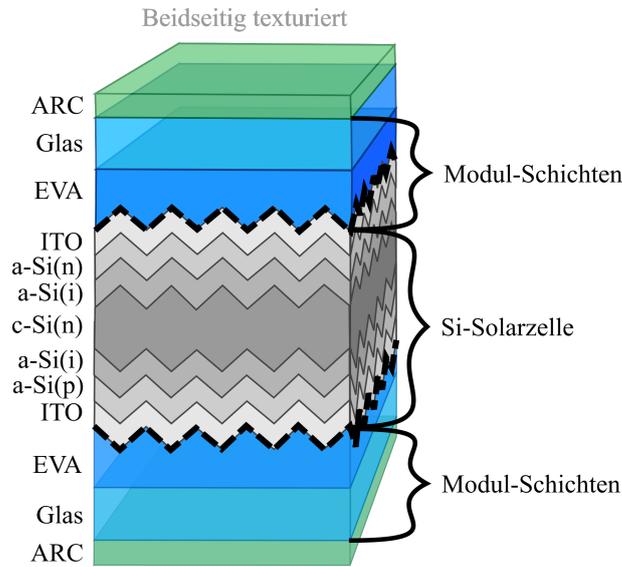


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung des bifazialen Si-Solarmoduls mit Textur an der Vorder- und Rückseite des c-Si. Das Bauteil wird als Referenz zum Vergleich mit bifazialen Perowskit/Si Tandem-Solarmodulen verwendet.

mit Textur (random upright) an der Vorder- und Rückseite des c-Si dargestellt. Der verwendete Schichtaufbau des Si-Solarmoduls ist ARC (130 nm)/Glas (3 mm)/EVA (300 μm)/ITO (70 nm)/a-Si(p) (5 nm)/a-Si(i) (5 nm)/c-Si (200 μm)/a-Si(i) (5 nm)/a-Si(n) (5 nm)/ITO (70 nm)/EVA (300 μm)/Glas (3 mm)/ARC (130 nm). Die Lichtabsorption im c-Si wurde für die Analyse von bifazialen Solarzellen über das Lambert-Beer'sche Gesetz berechnet. Somit wird das Schichtsystem an der Rückseite der HIT-Solarzelle sowie die rückseitigen Modul-Schichten und das ARC des bifazialen Solarmoduls explizit berücksichtigt. Das zugehörige monofaziale Si-Solarmodul wird an der Rückseite mit der Metallelektrode Ag (100 nm) anstelle der Modul-Schichten und des ARC modelliert.

Die HIT-Solarzelle mit metallischer Rückelektrode erreicht einen Wirkungsgrad von 24.7% [51]. Damit liegt die Effizienz der HIT-Solarzelle etwas unter dem Wirkungsgrad der IBC-Solarzelle mit 26.3% [3]. Da eine HIT-Solarzelle in Perowskit/Si 2T Solarmodulen aber aufgrund der Kompatibilität der elektrischen Kontakte für den Einsatz in 2T Solarmodulen geeigneter ist, wurde diese Architektur für die folgenden Berechnungen gewählt. Zur Modellierung der HIT-Solarzelle mit dem Eindiodenmodell wurden die elektrischen Parameter in Tabelle 5.1 verwendet.

Solarzelle	J_0 (mA cm ⁻²)	n	R_S (Ω)
Si	$2 \cdot 10^{-14}$	0.82	0.8

Tabelle 5.1: Sperrsättigungsstromdichte J_0 , Idealitätsfaktor n und Serienwiderstand R_S der HIT-Solarzelle für das Eindiodenmodell zur Berechnung der J - U -Kennlinie.

Die optischen und elektrischen Eigenschaften der zugehörigen monofazialen Solarzelle ohne EVA/Glas/ARC an der Vorderseite sind in Abbildung 5.2 dargestellt. Die Eigenschaften wurden unter STC mit senkrechtem Lichteinfall und dem AM1.5g Spektrum berechnet. Der Aufbau

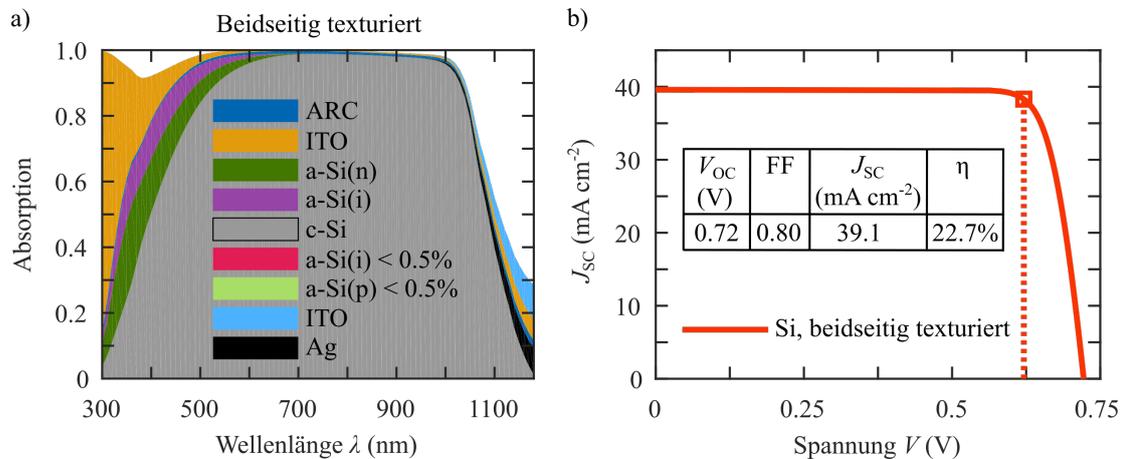


Abbildung 5.2: a) Spektrale Absorption im Schichtstapel der Si-Solarzelle mit beidseitiger Textur des c-Si unter senkrechten Lichteinfall. b) Zugehörige J - U -Kennlinie sowie elektrische Kenngrößen der Si-Solarzelle unter STC. Entnommen aus [108] und angepasst.

der monofazialen und bifazialen Si-Solarzelle wird auch in der Architektur der Perowskit/Si Tandem-Solarmodule verwendet.

5.1.2 2-Terminal Perowskit-Silizium Solarmodule

Die 2T-Verschaltung wird häufig in Perowskit/Si Tandem-Solarzellen eingesetzt und auf dieser Verschaltung basieren die derzeit hochleistungsfähigsten Tandem-Solarzellen mit einem Wirkungsgrad von 29.15% [54]. Die hier untersuchten Architekturen der bifazialen Perowskit/Si 2T Solarmodule sind in Abbildung 5.3 aufgeführt und nutzen verschiedene Konzepte des Lichtmanagements auf Basis von texturiertem c-Si. Architektur (i) weist einen planaren Schichtstapel auf. Architektur (ii) basiert auf einem einseitig geätzten Si-Wafer mit flacher Vorderseite und texturierter Rückseite. Architektur (iii) weist ebenfalls ein c-Si mit flacher Vorderseite und texturierter Rückseite auf sowie eine Textur an der Oberseite des Frontglases. Bei Architektur (iv) sind die Vorder- und Rückseite des c-Si texturiert. Drei der Architekturen sind nach ähnlichem Prinzip wie in Kapitel 4 aufgebaut. Die darüber hinausgehende Architektur (iii) mit texturiertem Frontglas und rückseitig texturiertem c-Si ist der Architektur von Jöst *et al.* [57] nachempfunden. Dabei ahmt das texturierte Frontglas im Model den Aufbau einer texturierten Kunststoffolie auf einem Glassubstrat nach. Der Brechungsindex von Kunststoffolie und Glas ist etwa gleich. Die Textur an der Oberseite der Kunststoffolie wird durch Abformen des Profils eines texturierten Si-Wafers eingepreßt und entspricht einer typischen pyramidenförmigen Textur des c-Si. Entsprechend wird die Oberfläche des Glases im Model mit der Textur random upright versehen. Architektur (iii) vereint die Vorteile einer erhöhten Lichteinkopplung aufgrund der frontseitigen Textur und einer planaren Perowskit-Solarzelle mit hoher Qualität auf der flachen Vorderseite des c-Si.

Unabhängig von der Architektur wird derselbe Schichtstapel für die bifazialen Perowskit/Si 2T Solarmodule verwendet. Dabei ist der Schichtstapel der Si-Solarzelle ITO (70 nm)/a-Si(p) (5 nm)/a-Si(i) (5 nm)/c-Si (200 μm)/a-Si(i) (5 nm)/a-Si(n) (5 nm). Die Perowskit-Solarzelle ist monolithisch auf der Si-Solarzelle aufgebaut. Der Schichtstapel der Perowskit-Solarzelle ist ITO (10 nm)/NiO_x (20 nm)/Perowskit (0-750 nm)/TiO₂ (20 nm)/ITO (75 nm). Hierbei wird NiO_x

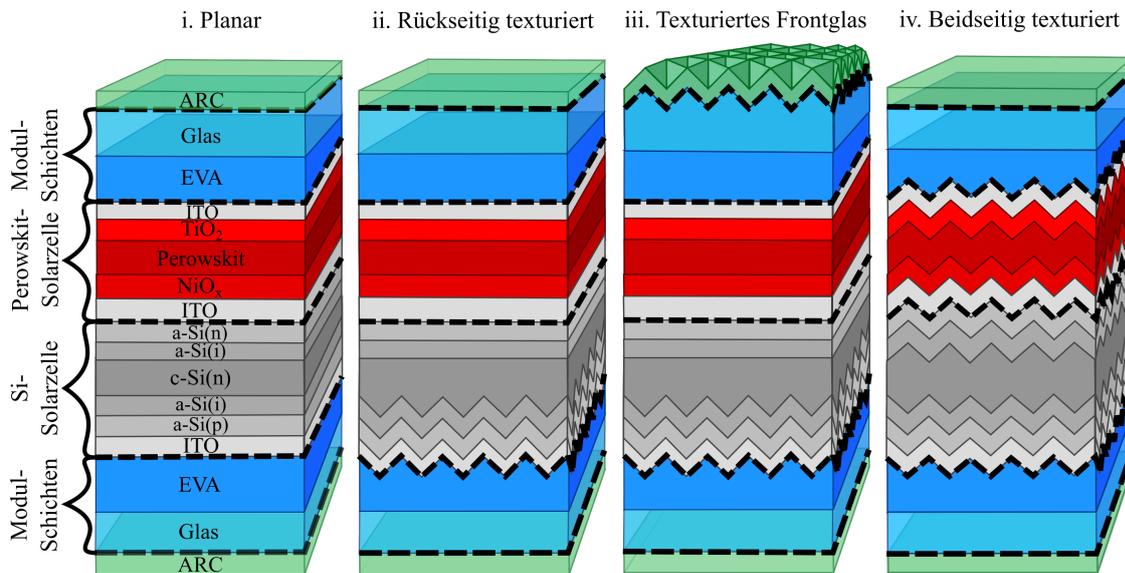


Abbildung 5.3: Architekturen der bifazialen Perowskit/Si 2T Solarmodule. (i) Architektur mit vollständig planarem Schichtstapel, (ii) mit flacher Vorderseite und texturierter Rückseite des c-Si, (iii) mit flacher Vorderseite und texturierter Rückseite des c-Si und texturiertem Frontglas und (iv) mit beidseitig texturiertem c-Si. Entnommen aus [108] und angepasst.

anstelle von Spiro-MeOTAD als Loch-Transportschicht verwendet. NiO_x bietet unter anderem einen Kosten-Vorteil und eine bessere Stabilität bei erhöhten Temperaturen gegenüber Spiro-MeOTAD [109]. Aufgrund der geringen Schichtdicke von 20 nm hat das verwendete Material der Loch-Transportschicht keinen bemerkenswerten Einfluss auf die Lichtabsorption im Tandem-Solarmodul. Die Vorderseite des bifazialen Tandem-Solarmoduls wird analog zum bifazialen Si-Solarmodul durch den Schichtstapel EVA (300 μm)/Glas (3 mm)/ARC (130 nm) abgeschlossen. Die transparente Rückseite ist mit demselben ARC und denselben Modul-Schichten ausgestattet. Die Kontaktfinger, Stromschienen und die Verdrahtung werden bei der Modellierung der bifazialen Solarmodule genauso wie zuvor bei den monofazialen Solarmodulen vernachlässigt.

Um die Steigerung des EY bifazialer Perowskit/Si 2T Solarmodule durch Albedo-Strahlung abzuschätzen, werden die Bauteile mit einem monofazialen Perowskit/Si 2T Solarmodul verglichen. Für das Referenzbauteil wird die Architektur (iv) mit beidseitig texturiertem c-Si gewählt und die transparente Rückseite wird durch eine metallische Rückelektrode ersetzt. Die Si-Solarzelle in allen monofazialen und bifazialen Perowskit/Si 2T Solarmodulen basiert auf der HIT-Solarzelle mit den elektrischen Eigenschaften aus dem vorigen Kapitel 5.1.1. Die verwendete Perowskit-Solarzelle ist vergleichbar mit der in Kapitel 4.2.2 über Elektrische Kenngrößen beschriebenen Perowskit-Solarzelle. Für die Optimierung der Perowskit-Bandlücke wurden dieselben Bandlücken im Bereich von 1.55 bis 1.88 eV verwendet.

5.1.3 4-Terminal Perowskit-Silizium Solarmodul

Bei Perowskit/Si Tandem-Solarmodulen mit einer 4T-Verschaltung werden die Subzellen getrennt gebaut und optimiert, um dann anschließend aufeinander gestapelt zu werden. Der aktuell höchste Wirkungsgrad von Perowskit/Si 4T Solarmodulen liegt bei 27.1% [110]. Bei der 4T-Verschaltung

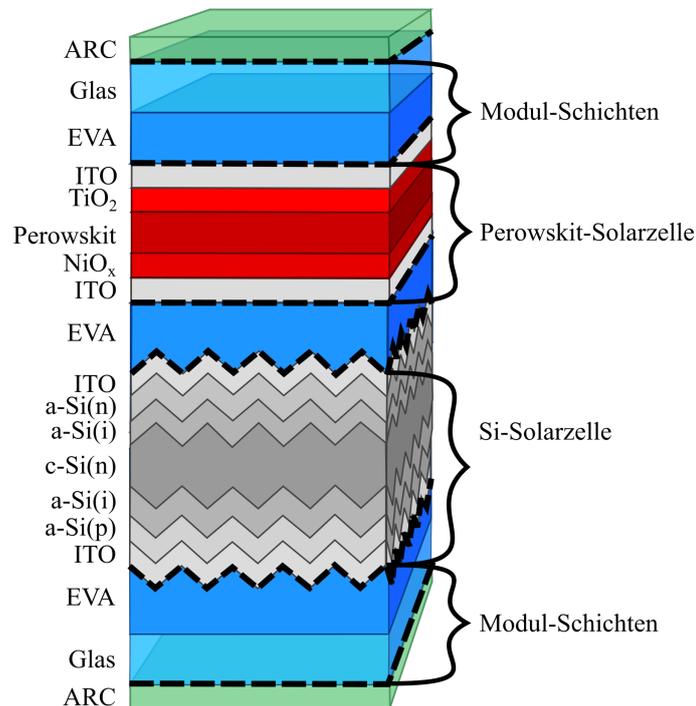


Abbildung 5.4: Architektur des bifazialen Perovskit/Si 4T Solarmoduls basierend auf einer beidseitig texturierten Si-Solarzelle und einer planaren Perovskit-Solarzelle. Die Solarzellen sind durch eine Verkapselungsschicht verbunden.

ist die parasitäre Absorption von Licht aufgrund der größeren Anzahl an transparenten Elektroden erhöht, aber die Subzellen können unabhängig voneinander betrieben werden und es treten keine Verluste durch Currentmismatch auf. Die Architektur des hier modellierten bifazialen Perovskit/Si 4T Solarmoduls besteht aus einer flachen Perovskit-Solarzelle gestapelt auf einer beidseitig texturierten HIT-Solarzelle. Die beiden Subzellen werden durch eine Verkapselungsschicht optisch verbunden. Alternative Architekturen basierend auf der 4T-Verschaltung werden hier nicht untersucht, da das Augenmerk dieser Arbeit auf der Optimierung des Designs monolithischer Perovskit/Si 2T Solarmodule liegt. Die Architektur des bifazialen Perovskit/Si 4T Solarmoduls ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Vorteilhaft sind die einfache Herstellung qualitativ hochwertiger planarer Perovskit-Solarzellen sowie die hohe Lichtabsorption in beidseitig texturierten Si-Solarzellen [111, 110].

Der Schichtaufbau der Si-Solarzelle entspricht dem in Kapitel 5.1.1 vorgestellten Schichtaufbau einer HIT-Solarzelle. Der Schichtaufbau der Perovskit-Solarzelle ist ITO (150 nm)/NiO_x (20 nm)/Perovskit (0-750 nm)/TiO₂ (20 nm)/ITO (100 nm). Die optimale Dicke der ITO-Schichten in Perovskit-Solarzellen hängt von den erforderlichen elektrischen und optischen Eigenschaften des TCOs ab und kann stark variieren. Die hier verwendeten Schichtdicken sind an planare Perovskit-Solarzellen basierend auf nasschemischer Abscheidung angepasst [112, 36]. Die Verkapselungsschicht zwischen der Si-Solarzelle und der Perovskit-Solarzelle ist EVA (1.5 mm). Wie bei den bifazialen Perovskit/Si 2T Solarmodulen werden die Vorder- und Rückseite des

Schichtstapels durch die Modul-Schichten EVA (300 μm) und Glas (3 mm) sowie durch ein ARC (130 nm) zur Reduzierung der Reflexionsverluste ergänzt.

5.2 Lichtabsorption für Vorder- und Rückseite

Die zusätzliche elektrische Leistung in bifazialen Solarzellen wird hauptsächlich durch Albedo-Strahlung gewonnen. Da die Albedo-Strahlung größtenteils auf die Rückseite der Solarzelle auftrifft, ist eine detaillierte Analyse der Absorption für rückseitig eingekoppelte Strahlung unerlässlich. Die optische Analyse wird hierbei für den wichtigsten Fall unter senkrechter Einstrahlung durchgeführt. Die Absorption wird für Strahlung an der Vorderseite und an der Rückseite getrennt berechnet und schließlich wird die Absorption in den verschiedenen Architekturen verglichen. Dabei dient das bifaziale Si-Solarmodul als Referenz und das bifaziale Perowskit/Si 2T Solarmodul mit (iv) beidseitiger Textur des c-Si sowie das bifaziale Perowskit/Si 4T Solarmodul werden gegenüber gestellt. Es wird hier eine Perowskit-Bandlücke von 1.55 eV für beide Verschaltungen der Tandem-Solarmodule gewählt. Das bifaziale Perowskit/Si 2T Solarmodul mit beidseitig texturiertem c-Si zeigt von allen untersuchten Architekturen mit 2T-Verschaltung die höchste Absorption und wird für den Vergleich verwendet. In Abbildung 5.5 sind die Absorptionsspektren der drei genannten bifazialen Architekturen sowohl für die Vorderseite als auch für die Rückseite aufgeführt. Das bifaziale Si-Solarmodul mit beidseitiger Textur des c-Si weist in beiden Richtungen bis auf parasitäre Absorption im UV-Bereich und im blauen Bereich nur geringfügige optische Verluste auf. An der Vorderseite des bifazialen Perowskit/Si 2T Solarmoduls wird kurzwelliges Licht bis zur Wellenlänge 800 nm hauptsächlich im Perowskit absorbiert und langwelliges Licht hauptsächlich im c-Si. Rückseitig eingekoppelte Strahlung hingegen wird ausschließlich im c-Si absorbiert. Aufgrund der kleineren Bandlücke von Si sowie der großen Schichtdicke von 200 μm wird insbesondere kurzwelliges Licht schon im c-Si absorbiert, bevor es den Perowskit erreicht und an der hohen Bandlücke absorbiert werden kann. Das bifaziale Perowskit/Si 4T Solarmodul zeigt bei der Absorption über die Vorderseite erhöhte Verluste durch Reflexion von Strahlung an der flachen Oberseite des Solarmoduls aufgrund der planaren Perowskit-Solarzelle. Die Lichteinkopplung an der Rückseite ist wie bei der 2T-Verschaltung aufgrund der Textur des c-Si hoch. Zudem wird auch bei der 4T-Verschaltung im Perowskit keine Strahlung über die Rückseite absorbiert.

Die Verluste durch Transmission von Strahlung an der transparenten Rückseite der bifazialen Perowskit/Si Tandem-Solarmodule sind sehr gering und haben keinen besonderen Einfluss auf die Absorption. Zur Demonstration werden die Absorptionsspektren der monofazialen Perowskit/Si Tandem-Solarmodule für Lichteinfall an der Vorderseite in Abbildung 5.6 zum Vergleich herangezogen. Wie bereits beschrieben, wird die Schichtfolge EVA/Glas/ARC an der Rückseite der bifazialen Solarmodule durch Ag in den monofazialen Solarmodulen ersetzt. Der Vergleich zeigt eine geringfügig erhöhte Absorption im c-Si für Strahlung im Infrarot-Bereich. Bei rückseitiger Beleuchtung gelangt aufgrund der metallischen Rückelektrode keine Strahlung in die monofazialen Bauteile und es kann kein Licht absorbiert werden.

Die Auswirkung von Albedo-Strahlung auf die elektrische Leistung in bifazialen Solarmodulen wird anhand von $J-U$ -Kennlinien veranschaulicht. Hierzu wird die Vorderseite mit dem AM1.5g Spektrum konform zu STC beleuchtet und die Rückseite wird mit 30% der Strahlungsintensität unter senkrechtem Lichteinfall beleuchtet. Die $J-U$ -Kennlinien der bifazialen Solarmodule und der monofazialen Referenzbauteile sind in Abbildung 5.7 dargestellt. Die J_{SC} des bifazialen Si-

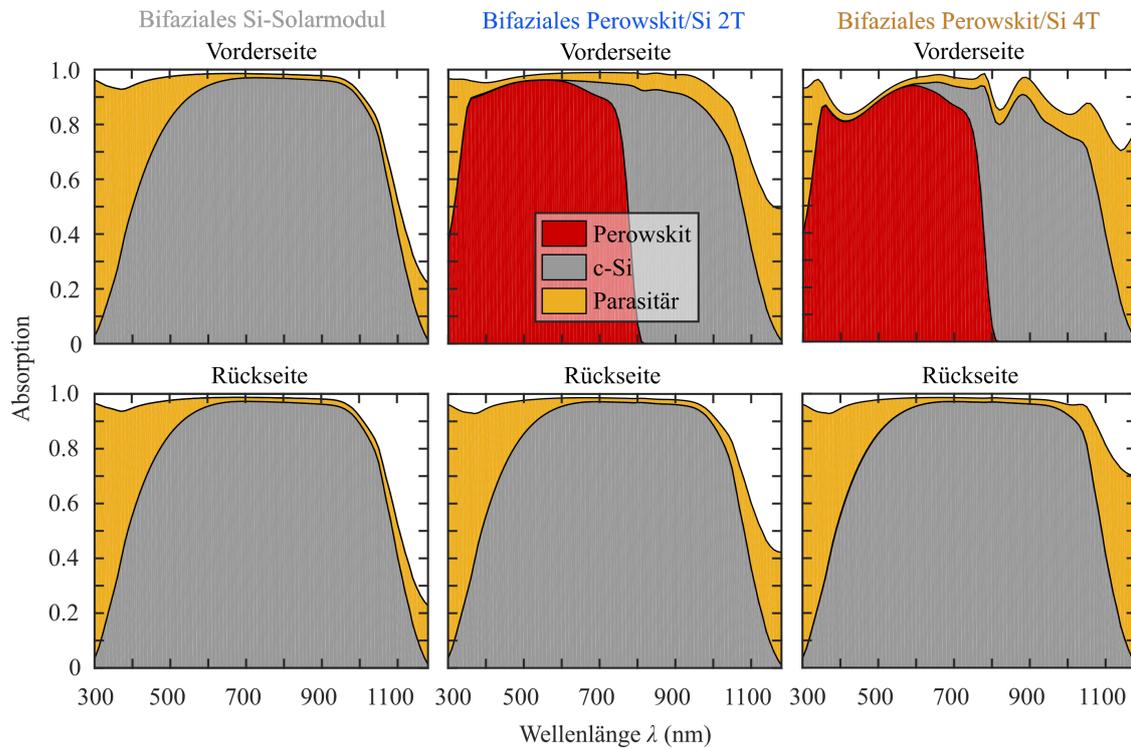


Abbildung 5.5: Absorptionsspektren der Architekturen bifaziales Si-Solarmodul, bifaziales Perowskit/Si 2T Solarmodul und bifaziales Perowskit/Si 4T Solarmodul. Die Absorption ist jeweils für senkrechten Lichteinfall an der Vorderseite des Solarmoduls (oben) und an der Rückseite des Solarmoduls (unten) gezeigt. Zu sehen ist die Absorption im Perowskit, im c-Si sowie die parasitäre Absorption in allen übrigen Schichten der jeweiligen Schichtstapel. Entnommen aus [108] und angepasst.

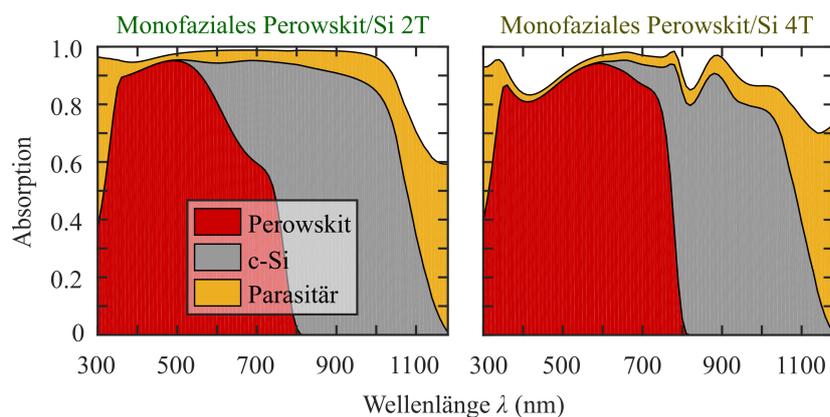


Abbildung 5.6: Darstellung der Absorption in den Architekturen monofaziales Perowskit/Si 2T Solarmodul und monofaziales Perowskit/Si 4T Solarmodul. Die Schichtstapel werden dabei an der Vorderseite unter senkrechtem Lichteinfall beleuchtet. Entnommen aus [108] und angepasst.

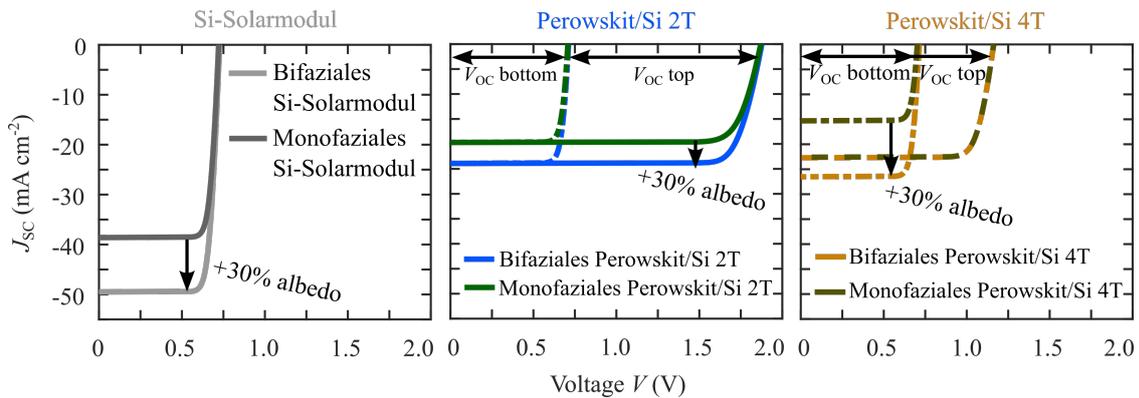


Abbildung 5.7: Darstellung der J - U -Kennlinien verschiedener Architekturen unter Beleuchtung mit AM1.5g Spektrum an der Vorderseite sowie 30% der Intensität an der Rückseite. Aufgeführt sind jeweils die monofazialen und bifazialen Architekturen eines Si-Solarmoduls, Perowskit/Si 2T Solarmoduls und Perowskit/Si 4T Solarmoduls. Entnommen aus [108] und angepasst.

Solarmoduls steigt gegenüber dem monofazialen Si-Solarmodul durch die erhöhte Lichtabsorption im c-Si aufgrund der einfallenden Albedo-Strahlung an der Rückseite. Im bifazialen Perowskit/Si 2T Solarmodul wird durch rückseitige Strahlung ausschließlich die Menge des absorbierten Lichts im c-Si erhöht. Im dargestellten Fall des bifazialen Perowskit/Si 2T Solarmoduls wurde entsprechend die Perowskit-Schicht für Currentmatching angepasst und ist wesentlich dicker als beim monofazialen Referenzbauteil. Entsprechend steigt die J_{SC} in beiden Subzellen und somit im Tandem-Solarmodul. Die J - U -Kennlinien im bifazialen Perowskit/Si 4T Solarmodul zeigen die Steigerung der J_{SC} in der Si-Solarzelle durch die Albedo-Strahlung. Die J_{SC} in der Perowskit-Solarzelle bleibt für das monofaziale und bifaziale Tandem-Solarmodul gleich. Der sehr allgemeine Fall der Lichtabsorption in Tandem-Solarmodulen unter senkrechter Einstrahlung zeigt exemplarisch den Einfluss von Albedo-Strahlung bei der folgenden Simulation des EY unter realistischen Einstrahlungsbedingungen.

5.3 Energieertrag der 2-Terminal Solarmodule

Zur Bestimmung des maximalen EY von bifazialen Perowskit/Si 2T Solarmodulen ist es zwingend erforderlich, die Verluste durch Currentmismatch so gering wie möglich zu halten. Die Optimierung der Architekturen mit 2T-Verschaltung unter dem Einfluss von Albedo-Strahlung ist nicht trivial. Daher spielt die Untersuchung der Perowskit/Si 2T Solarmodule eine zentrale Rolle. Wie bereits in Kapitel 4 erläutert, ist unter realistischen Bedingungen neben dem Einfallswinkel und dem Spektrum auch die Intensität der einfallenden direkten und diffusen Strahlung zeitabhängig und erfordert die numerische Simulation des EY. Die Intensität der am Boden reflektierten Strahlung ist ebenso zeitabhängig und hängt zudem vom Reflexionsvermögen des Bodens ab. Somit ist das EY-Modell auch für eine detaillierte Analyse der bifazialen Solarmodule unerlässlich. In diesem Kapitel wird eine Optimierung des EY für verschiedene Untergründe mit unterschiedlicher Albedo durchgeführt. Hierbei wird zunächst auf das Verhalten der optimalen Perowskit-Schichtdicke in Abhängigkeit der Albedo für eine feste Bandlücke des Perowskits und für die Architektur basierend auf beidseitig texturiertem c-Si eingegangen. Anschließend wird

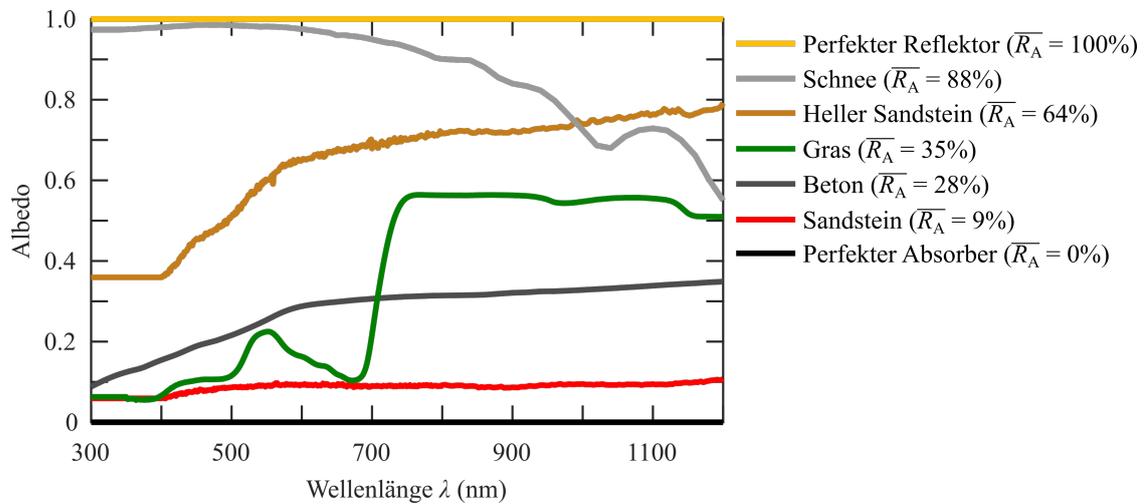


Abbildung 5.8: Darstellung der Reflexionsspektren der fünf Böden Sandstein, Beton, Gras, heller Sandstein und Schnee sowie der zwei künstlichen Untergründe perfekter Absorber und perfekter Reflektor. Die Spektren werden für die Berechnung der Albedo-Strahlung verwendet. Für jeden Boden ist die zugehörige $\overline{R_A}$ in der Legende angegeben. Entnommen aus [108] und angepasst.

der EY für verschiedene Perowskit-Bandlücken bei optimierter Schichtdicke und optimiertem Neigungswinkels des Moduls bestimmt. Zur Untersuchung von klimatischen Einflüssen wird der EY an den Orten Daggett (Kalifornien) und Portland (Oregon) bestimmt. Schließlich werden alle vorgestellten Architekturen der Perowskit/Si 2T Solarmodule (siehe Kapitel 5.1.2) gegenüber gestellt.

5.3.1 Currentmatching unter Albedo-Strahlung

Für die Bestimmung des maximalen EY von bifazialen Perowskit/Si 2T Solarmodule wird zuerst der allgemeine Einfluss von Albedo-Strahlung auf den EY und das Design der Bauteile untersucht. Die Albedo-Strahlung wird auf Basis von fünf Böden mit einer mittleren Reflexion $\overline{R_A}$ im Bereich von 9-88% berechnet. Der Bereich wird durch zwei künstliche Böden mit einerseits $\overline{R_A} = 0\%$ (perfekter Absorber) und andererseits $\overline{R_A} = 100\%$ (perfekter Reflektor) erweitert, um den gesamten Bereich der Albedo-Strahlung abzudecken. Die Reflexionsspektren $R_A(\lambda)$ aller Untergründe sind in Abbildung 5.8 aufgeführt. Neben den verschiedenen Reflexionsspektren bildet die mittlere Reflexion $\overline{R_A}$ im Bereich von 300-1200 nm ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal. Wie bereits erläutert, hat die Intensität der Albedo-Strahlung im Wesentlichen Einfluss auf die Lichtabsorption im c-Si, da rückseitig auftreffende Albedo-Strahlung in Perowskit/Si Tandem-Solarmodulen im c-Si absorbiert wird, bevor sie den Perowskit erreicht und dort absorbiert werden kann. Infolge dessen ändert sich die optimale Schichtdicke des Perowskits in Abhängigkeit der Intensität der Albedo-Strahlung, um Currentmatching zu erreichen. Zur Veranschaulichung dieses Zusammenhangs wird im Folgenden der EY eines monofazialen Solarmoduls als Funktion der Perowskit-Schichtdicke sowie die mittlere J_{SC} in den Subzellen gezeigt und anschließend mit einer bifazialen Architektur bei Böden mit verschiedener Albedo verglichen.

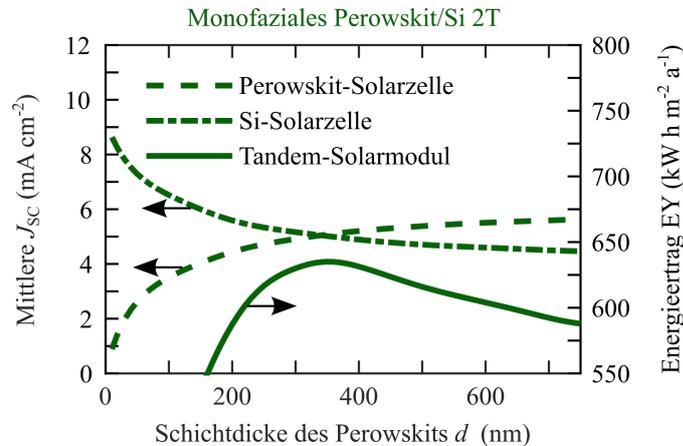


Abbildung 5.9: EY eines monofazialen Perowskit/Si 2T Solarmoduls und die mittlere J_{SC} in beiden Subzellen als Funktion der Perowskit-Schichtdicke. Für die Berechnung wurde die Lichteinstrahlung am Ort Daggett verwendet sowie der Neigungswinkel des Moduls optimiert. Entnommen aus [108].

Der EY des monofazialen Perowskit/Si 2T Solarmoduls mit beidseitiger Textur des c-Si sowie die mittlere J_{SC} in den Subzellen ist für den Ort Daggett in Abbildung 5.9 dargestellt. Die verwendete Bandlücke des Perowskits ist hier 1.72 eV und liegt nach De Vos [31] im Bereich der optimalen Bandlücke für ein Tandem auf Basis von Si. Die mittlere J_{SC} ist dabei definiert als die durchschnittliche J_{SC} pro Jahr. Das Currentmatching am Schnittpunkt der beiden Kurven für die mittlere J_{SC} der Perowskit-Solarzelle und der Si-Solarzelle bezeichnet also den Punkt gleichen mittleren Stroms oder in anderen Worten auch des über das Jahr integrierten Stroms (siehe Abbildung 5.9). Die Ströme der Subzellen bei der entsprechenden Schichtdicke können hingegen zu beliebigen konkreten Zeitpunkten voneinander abweichen. Der berechnete EY und die mittlere J_{SC} für ein entsprechendes bifaziales Solarmodul sind in Abbildung 5.10 für die Böden Sandstein ($\overline{R_A} = 9\%$) und Beton ($\overline{R_A} = 28\%$) gezeigt. Der Vergleich zeigt eine Steigerung des EY mit zunehmender Intensität der Albedo-Strahlung. Dabei steigt der EY für Sandstein um 10% relativ und für Beton um 19% relativ im Vergleich zum monofazialen Perowskit/Si 2T Solarmodul. Die optimale Schichtdicke des Perowskits für minimale Verluste durch Currentmismatch wird mit zunehmender Albedo-Strahlung größer, da die Lichtabsorption im Perowskit durch eine dickere Schicht an die höhere Lichtabsorption im c-Si unter Albedo-Strahlung angepasst werden muss. Bereits im Bereich der Albedo von 0-28% ist eine signifikante Änderung der optimalen Schichtdicke zu beobachten. Die optimale Schichtdicke des monofazialen Perowskit/Si 2T Solarmoduls ist 350 nm und vergrößert sich auf 570 nm (Sandstein) bzw. >750 nm (Beton) für das bifaziale Solarmodul. Für Beton überschreitet die optimale Schichtdicke des Perowskits die obere Grenze 750 nm des in der Simulation festgelegten Bereichs. Es wurde derselbe Bereich wie in Kapitel 4 über die Berechnung des EY von monofazialen texturierten Perowskit/Si 2T Solarmodulen festgelegt. Eine Dicke von 750 nm ist bereits deutlich größer als die Schichtdicke in effizienten Perowskit-Solarzellen [90, 95, 98]. Der Strom des bifazialen Perowskit/Si 2T Solarmoduls ist somit für den Untergrund Beton mit $\overline{R_A} = 28\%$ limitiert durch den Strom in der Perowskit-Solarzelle, da nicht genügend Licht im Perowskit absorbiert wird. Eine weitere Möglichkeit zur Anpassung des Stroms in bifazialen Perowskit/Si 2T Solarmodulen unter dem Einfluss von Albedo-Strahlung

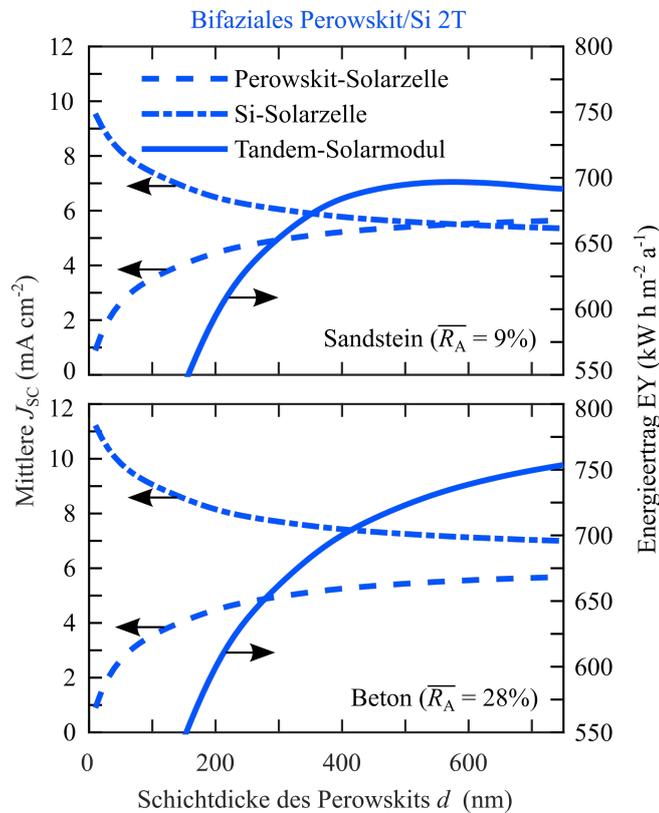


Abbildung 5.10: Darstellung des EY eines bifazialen Perowskit/Si 2T Solarmoduls sowie der mittleren J_{SC} in beiden Subzellen am Ort Daggett. Im oberen Schaubild wurde mit der Albedo-Strahlung des Bodens Sandstein gerechnet und im unteren Schaubild mit der Albedo-Strahlung des Untergrunds Beton. Der Neigungswinkel des Moduls ist optimiert. Entnommen aus [108].

bietet die Perowskit-Bandlücke. Die Maximierung des EY durch Optimierung der Bandlücke wird im folgenden Kapitel untersucht.

5.3.2 Optimierung der Perowskit-Bandlücke

Die Optimierung der Bandlücke durch Veränderung der Perowskit-Komposition kann den EY der bifazialen Perowskit/Si 2T Solarmodule über die Anpassung der Schichtdicke hinaus maximieren. Wie in Kapitel 5.3.1 gezeigt, wird der EY der 2T-Verschaltung mit einem Perowskit der Bandlücke 1.72 eV durch die Limitierung des Stroms in der Perowskit-Solarzelle für den Boden Beton mit $\overline{R}_A = 28\%$ sowie für Untergründe mit höherer Albedo begrenzt. Die Abhängigkeit des EY von der Bandlücke des Perowskits wird zunächst für die Architektur auf Basis von beidseitig texturiertem c-Si untersucht. Um den Zugewinn durch Albedo-Strahlung in bifazialen Solarmodulen zu analysieren, wird unter anderem das monofaziale Perowskit/Si 2T Solarmodul mit beidseitig texturiertem c-Si und verschiedenen Bandlücken als Referenz verwendet. Der EY wird für Perowskit-Bandlücken im Bereich von 1.55 bis 1.88 eV untersucht. Abbildung 5.11 zeigt den EY der bifazialen Perowskit/Si 2T Solarmodule für die verschiedenen Bandlücken sowie für alle Böden mit einer mittleren Albedo von 0 bis 100%. Hierbei ist der maximale EY

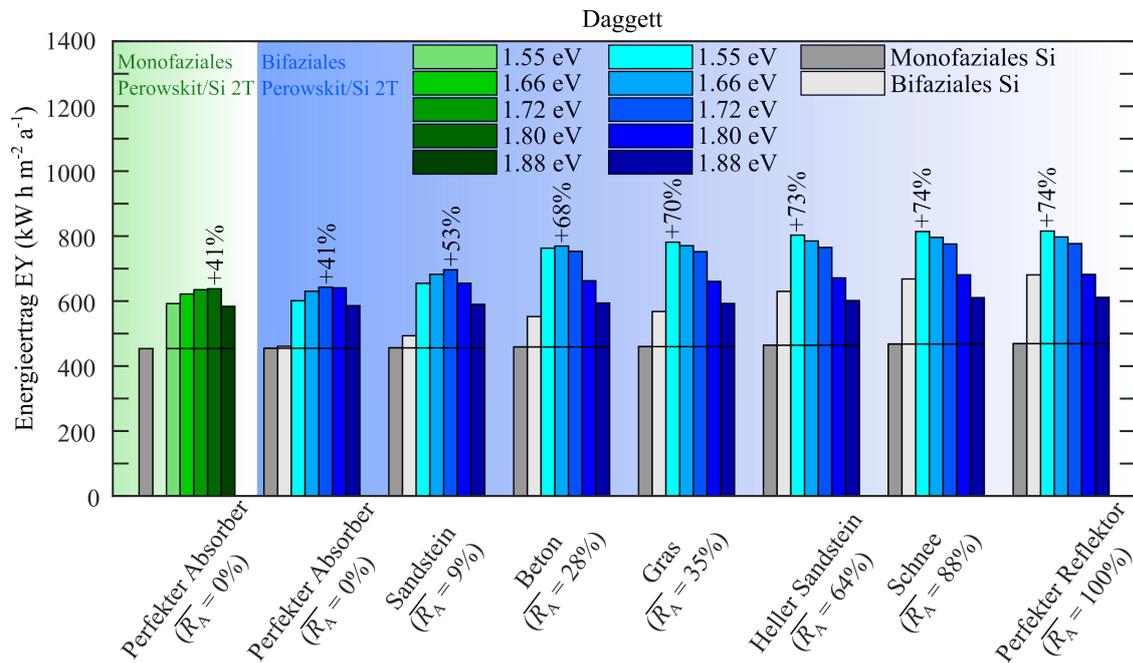


Abbildung 5.11: Maximaler EY der bifazialen Perowskit/Si 2T Solarmodule am Ort Daggett für verschiedene Perowskit-Bandlücken im Bereich von 1.55 bis 1.88 eV sowie für die Böden mit \overline{R}_A von 0 bis 100%. Zum Vergleich sind die Referenzbauteile monofaziales und bifaziales Si-Solarmodul sowie monofaziales Perowskit/Si 2T Solarmodul aufgeführt. Für jeden Boden ist die maximale relative Steigerung des EY im Vergleich zum monofazialen Si-Solarmodul an der optimalen Bandlücke eingetragen. Entnommen aus [108] und angepasst.

bei optimierter Perowskit-Schichtdicke und optimiertem Neigungswinkel des Moduls für den Wüstenort Daggett gezeigt. Die Böden Gras und Schnee werden zur Vollständigkeit in die Berechnung aufgenommen, auch wenn diese Böden in heißem Wüstenklima nicht anzutreffen sind. Der Vergleich mit dem monofazialen Perowskit/Si 2T Solarmodul (siehe Abbildung 5.11 links) zeigt eine Steigerung des EY von $638 \text{ kW h m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ der monofazialen Referenz auf $781 \text{ kW h m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ des bifazialen Tandem-Solarmoduls für den Boden Gras. Dabei wird eine relative Steigerung des EY um 22% durch Albedo-Strahlung mit $\overline{R}_A = 35\%$ bei optimierter Schichtdicke und Bandlücke des Perowskits erzielt.

Die relative Steigerung im Vergleich zu einem monofazialen Si-Solarmodul ist in Abbildung 5.11 für jeden Boden an der optimalen Perowskit-Bandlücke eingetragen. Es wird angemerkt, dass der EY auch für das monofaziale Si-Solarmodul mit steigender Albedo zunimmt, da bei geneigtem Modul ein geringer Teil der Albedo-Strahlung auf die Vorderseite des Moduls auftrifft. Der EY des monofazialen Si-Solarmoduls ist in Abbildung 5.11 gezeigt, aber die Zunahme ist sehr gering und kaum im Schaubild erkennbar. Weiter ist in Abbildung 5.11 der EY eines bifazialen Si-Solarmoduls für alle Böden aufgeführt. Die relative Steigerung des EY für ein bifaziales Perowskit/Si 2T Solarmodul im Vergleich zum bifazialen Si-Solarmodul beträgt beispielsweise 38% für den Boden Gras mit $\overline{R}_A = 35\%$. Der EY wurde für die untersuchten Architekturen zudem am Ort Portland mit gemäßigttem Klima und vergleichsweise ausgewogenem Verhältnis der Intensität von direkter und diffuser Strahlung berechnet (siehe Abbildung 5.12). Die Zusammenhänge zwischen der

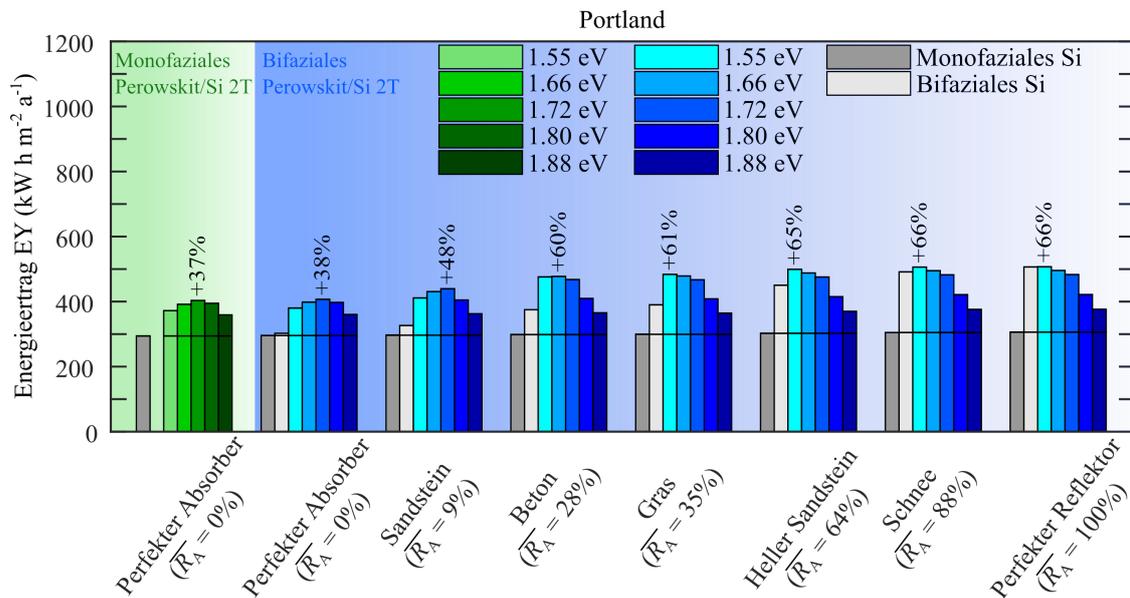


Abbildung 5.12: Darstellung des maximalen EY von bifazialen Perowskit/Si 2T Solarmodulen für verschiedene Perowskit-Bandlücken und Böden am Ort Portland. Die Details sind wie in Abbildung 5.11. Entnommen aus [108] und angepasst.

optimalen Bandlücke des Perowskits und der Albedo-Strahlung sind dieselben wie für Daggett, und der EY fällt in Portland aufgrund der geringeren Einstrahlungsintensität kleiner aus.

Bemerkenswert ist die Änderung der optimalen Perowskit-Bandlücke für Böden mit einer geringen Albedo. Die optimale Bandlücke für Gras sowie Böden mit höherer Albedo ($\overline{R}_A \geq 35\%$) ist 1.55 eV. Für Beton ($\overline{R}_A = 28\%$) liegt die optimale Bandlücke bei 1.66 eV und für Sandstein sowie Böden mit geringerer Albedo ($\overline{R}_A \leq 9\%$) bei 1.72 eV. Da gerade Böden mit geringer Albedo häufig vorkommen, ist die Anpassung der Bandlücke an den Boden umso wichtiger für den maximalen Ertrag des bifazialen Tandem-Solarmoduls.

Bis auf Gras unterscheiden sich die Reflexionsspektren der Böden im Wesentlichen durch die mittlere Intensität der Reflexion \overline{R}_A . Gras weist ab einer Wellenlänge von 700 nm eine deutlich erhöhte Reflexion im Vergleich zur seiner mittleren Reflexion von $\overline{R}_A = 35\%$ auf (siehe Abbildung 5.8). Es wurden weder Einflüsse der spektralen Reflexion auf den EY noch Einflüsse auf die optimale Bandlücke festgestellt. Da die Albedo-Strahlung im Wesentlichen auf die Rückseite des Solarmoduls fällt und somit im c-Si absorbiert wird, spielt das Spektrum der Albedo-Strahlung eine untergeordnete Rolle für die Menge des absorbierten Lichts im c-Si.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die optimale Bandlücke des Perowskits für bifaziale Perowskit/Si 2T Solarmodule grundsätzlich nicht der optimalen Bandlücke für monofaziale Solarmodule entspricht. Während monofaziale Perowskit/Si 2T Solarmodule den höchsten EY für Bandlücken im Bereich von 1.7-1.8 eV erzielen (siehe Abbildungen 5.11 und 5.12), wird die optimale Bandlücke mit zunehmender Albedo-Strahlung geringer und erreicht bereits für Gras mit $\overline{R}_A = 35\%$ die kleinste Bandlücke 1.55 eV des hier untersuchten Intervalls. Die Änderung der optimalen Bandlücke für Böden mit einer Albedo im Bereich von 0 bis 35% zeigt, dass das richtige Design der bifazialen Perowskit/Si 2T Solarmodule bedeutend für eine hohe Ausbeute ist. Neben der passen-

den Wahl der Perowskit-Zusammensetzung ist auch die Optimierung der Perowskit-Schichtdicke hinsichtlich Currentmatching unerlässlich.

5.3.3 Architekturvergleich

Die verschiedenen Ansätze für die Realisierung von bifazialen Perowskit/Si Solarmodulen basierend auf einer 2T-Verschaltung wurden in Kapitel 5.1.2 erläutert. Das Konzept beruht auf dem Einbringen von Texturen an verschiedenen Stellen der Architektur einer Perowskit/Si Tandem-Solarzelle, um die Lichtabsorption zu erhöhen. Im Folgenden werden die vier bereits vorgestellten Architekturen (i) - (iv) (siehe Abbildung 5.3) verglichen. Dabei wird die umfangreiche Optimierung der Perowskit-Bandlücke für die Architektur (iv) mit beidseitig texturiertem c-Si am Ort Daggett im vorigen Kapitel 5.3.2 (siehe Abbildung 5.11) an allen übrigen Architekturen durchgeführt. In Abbildung 5.13 ist der EY der entsprechenden bifazialen Perowskit/Si 2T Solarmodule dargestellt. Die optimale Bandlücke der Architektur (i) Planar ist etwas höher als bei den übrigen Architekturen. Aufgrund der flachen Vorder- und Rückseite des c-Si ist die Absorption der infraroten Strahlung im c-Si geringer. Dieser Effekt wird durch eine höhere Perowskit-Bandlücke kompensiert, um den Strom in der Perowskit-Solarzelle anzupassen und die Verluste durch Currentmismatch zu minimieren. Die höhere Perowskit-Bandlücke für planare Schichtstapel wurde von Jöst *et al.* auch in monofazialen Perowskit/Si 2T Solarzellen [57] festgestellt. Beim Design von hochleistungsfähigen Tandem-Solarzellen muss dementsprechend für die Wahl der optimalen Perowskit-Bandlücke die Architektur miteinbezogen werden.

Der Vergleich zeigt, dass der maximale EY für das gesamte Spektrum der Albedo sukzessiv von Architektur (i) Planar über Architektur (ii) mit rückseitig texturiertem c-Si und Architektur (iii) mit rückseitig texturiertem c-Si und texturiertem Frontglas bis hin zu Architektur (iv) mit beidseitig texturiertem c-Si steigt. Die flache Vorderseite des c-Si in den Architekturen (i) - (iii) ermöglicht eine vergleichsweise einfache Herstellung hochqualitativer Perowskit-Solarzellen auf einer ebenen Oberfläche der Si-Solarzelle. Dabei wird durch die Textur des Frontglases in Architektur (iii) der vergleichsweise höchste EY erreicht. Unter allen Architekturen zeigt die Architektur (iv) basierend auf beidseitig texturiertem c-Si die beste Lichteinkopplung und damit den höchsten EY. Die Umsetzung von Architektur (iv) ist aufgrund der texturierten Vorderseite des c-Si technologisch schwieriger. Grenzflächeneffekte wie Rekombination von Ladungsträgern nehmen hier aufgrund der deutlich größeren Fläche der Textur zu und müssen daher umso dringender vermieden werden. Dennoch ist diese Architektur am vielversprechendsten auf dem Weg zu hocheffizienten Solarzellen.

5.4 Vergleich der Verschaltungen

Die verbreitetsten Verschaltungen von Perowskit/Si Tandem-Solarzellen sind die 2T- und 4T-Verschaltung. Während bei einer 2T-Verschaltung im Wesentlichen die Verluste durch Currentmismatch reduziert werden müssen, ist bei einer 4T-Verschaltung hauptsächlich die parasitäre Absorption in den vier Elektroden von Nachteil. In Abbildung 5.14 werden das bifaziale Perowskit/Si 2T Solarmodul mit beidseitig texturiertem c-Si (iv) und das bifaziale Perowskit/Si 4T Solarmodul mit planarer Perowskit-Solarzelle und beidseitig texturierter Si-Solarzelle verglichen. Die entsprechenden Architekturen wurden in den Kapiteln 5.1.2 und 5.1.3 vorgestellt. Der EY wird als Funktion der Albedo an den Orten Daggett und Portland aufgetragen und weiter mit den

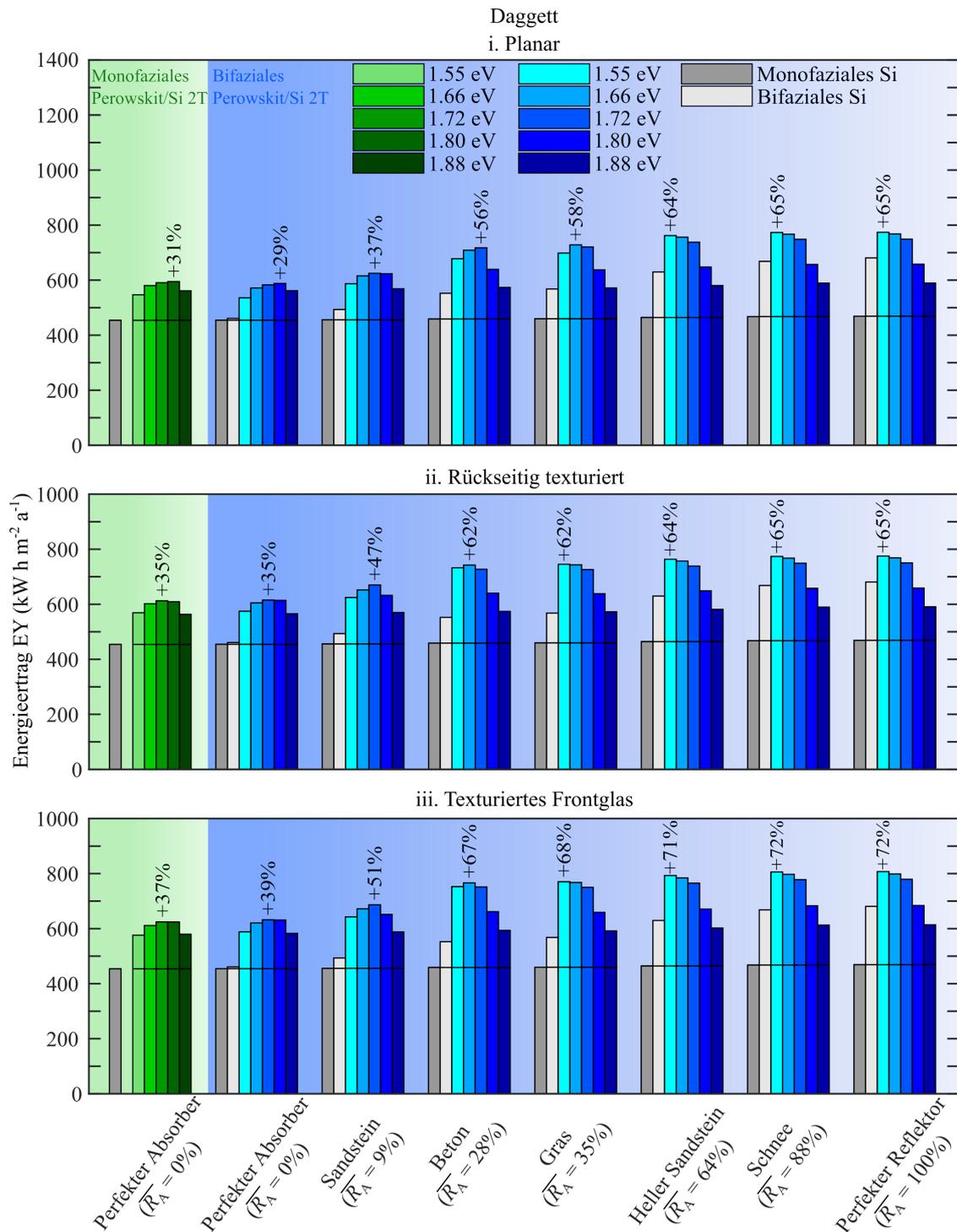


Abbildung 5.13: Maximaler EY für die Architekturen (i) Planar, (ii) mit rückseitig texturiertem c-Si und Architektur (iii) mit rückseitig texturiertem c-Si und texturiertem Frontglas. Der EY wurde für verschiedene Perowskit-Bandlücken und für verschiedene Böden am Ort Daggett berechnet. Wie in Abbildung 5.11 ist zum Vergleich der EY der Referenzbauteile monofaziales und bifaziales Si-Solarmodul sowie monofaziales Perowskit/Si 2T Solarmodul aufgeführt. Die maximale relative Steigerung des EY im Vergleich zum monofazialen Si-Solarmodul ist für jeden Boden an der optimalen Bandlücke eingetragen. Entnommen aus [108] und angepasst.

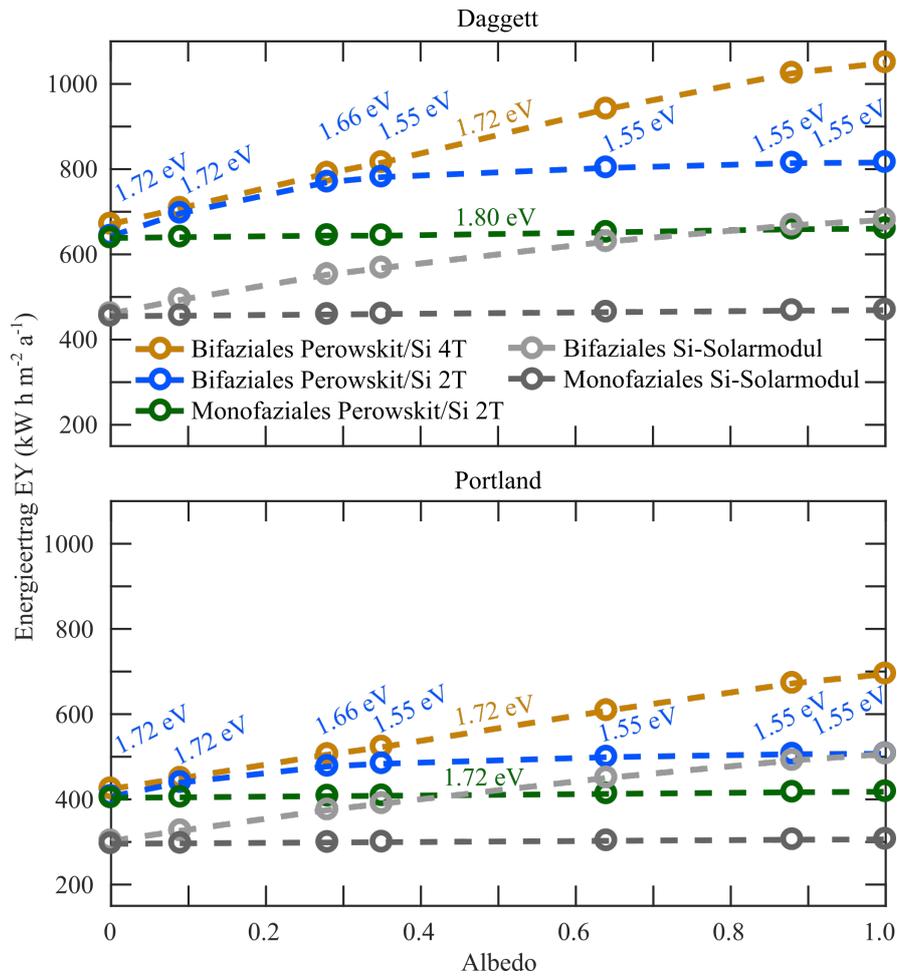


Abbildung 5.14: Darstellung des maximalen EY als Funktion der Albedo an den Orten Daggett und Portland für bifaziale Perowskit/Si 2T und 4T Solarmodule sowie für die Referenzbauteile. Dabei sind sowohl die Bandlücke und Schichtdicke des Perowskits optimiert, als auch der Neigungswinkel des Moduls. Für die Tandem-Solarmodule ist die jeweilige optimale Bandlücke angegeben. Entnommen aus [108] und angepasst.

bereits bekannten Referenzbauteilen verglichen. Das Design wurde hierbei für alle Architekturen optimiert, um den maximalen EY zu ermitteln. Die bifazialen Perowskit/Si Solarmodule erzielen den höchsten EY im gesamten Bereich der Albedo-Strahlung von 0 bis 100%. Im Vergleich zum bifazialen Si-Solarmodul ist die relative Steigerung des EY 24-38% für den Boden Gras mit $\overline{R_A} = 35\%$. Der maximale EY für die 2T- und 4T-Verschaltung unterscheidet sich kaum im Bereich von 0 bis 35%. Ab einer Albedo von 35% wird der Strom im bifazialen Perowskit/Si 2T Solarmodul durch die Perowskit-Solarzelle limitiert, da die Lichtabsorption im Perowskit nicht durch Albedo-Strahlung zunimmt. Die Schichtdicke des Perowskits erreicht die obere Grenze der Simulation bei 750 nm. In Abbildung 5.14 ist der entsprechende Knick im EY des bifazialen Perowskit/Si 2T Solarmoduls aufgrund der Verluste durch Currentmismatch in den Subzellen erkennbar. Die 4T-Verschaltung erreicht für $\overline{R_A} \geq 35\%$ den höchsten EY, da die gesamte absorbierte Strahlung im c-Si unabhängig von ihrer Intensität zur elektrischen Leistung des Moduls beiträgt. Allerdings sind Böden mit einer hohen Albedo $\overline{R_A} > 35\%$ seltener anzutreffen.

Die optimale Bandlücke für die Architektur mit 4T-Verschaltung ist unabhängig von der Albedo-Strahlung 1.72 eV. Da bei dieser Verschaltung die Perowskit- und Si-Solarzelle elektrisch voneinander unabhängig sind, ist für die ideale Bandlücke des Perowskits nur das Optimum zwischen der maximalen Anzahl generierter Ladungsträger im Perowskit und der Minimierung der Thermalisierungsverluste ausschlaggebend und die ideale Bandlücke liegt wie nach De Vos [31] im Bereich von 1.7 bis 1.8 eV. Für die 2T-Verschaltung hingegen ändert sich die optimale Bandlücke wesentlich, was im Detail im vorigen Kapitel 5.3.2 erläutert wurde. Die optimale Bandlücke des monofazialen Perowskit/Si 2T Solarmoduls ist im gesamten Bereich der Albedo-Strahlung ($\overline{R_A}$ von 0 bis 100%) wie zu erwarten konstant, da keine Strahlung über die opake Rückseite eingekoppelt wird. Wie für das monofaziale Si-Solarmodul ist auch die Erhöhung des EY durch Albedo-Strahlung für das monofaziale Perowskit/Si 2T Solarmodul in Abbildung 5.14 kaum merklich, da nur ein geringer Teil der Albedo-Strahlung auf die Vorderseite des geneigten Solarmoduls auftrifft.

Der allgemeine Vergleich des EY am Ort Daggett und Portland mit unterschiedlichen Klimazonen zeigt unabhängig von der Architektur, dass die optimale Perowskit-Bandlücke für Portland durchschnittlich kleiner ist als für Daggett. Die optimale Bandlücke für das monofaziale Perowskit/Si 2T Solarmodul in Abbildung 5.14 ist 1.80 eV für Daggett und 1.72 eV für Portland. Auch ein genauer Blick auf die Abbildungen 5.11 und 5.12 deutet auf diesen Zusammenhang für bifaziale Perowskit/Si 2T Solarmodule hin. Der Grund liegt in der geringeren APE des Einstrahlungsspektrums von Portland mit 1.49 eV im Vergleich zu Daggett mit 1.51 eV, wonach die ideale Bandlücke des Perowskits für Portland etwas geringer ausfällt. Auf die APE wurde genauer in Kapitel 4.3 beim Vergleich der optimalen Perowskit-Bandlücke zwischen STC und realistischen Bedingungen eingegangen. Die APE wurde in Langenhorst *et al.* für diverse Orte bestimmt und liegt im Bereich von 1.44 bis 1.54 eV. Da die optimale Bandlücke genauso wie das Einstrahlungsspektrum ortsabhängig ist, muss das Design der Tandem-Solarmodule an den Ort bzw. an die Lichtverhältnisse angepasst werden. Zusammenfassend demonstriert der Vergleich der beiden Verschaltungen, dass ein bifaziales Perowskit/Si 4T Solarmodul unter hoher Albedo aufgrund der elektrisch unabhängigen Subzellen einen höheren EY erzielt. Für die 2T-Verschaltung steigen dabei hingegen die Verluste durch Currentmismatch. Beide Verschaltungen übertreffen für gängige Böden mit einer Albedo bis 35% wie Beton oder Gras in einem ähnlichen Ausmaß den EY von bifazialen Si-Solarmodulen mit beidseitiger Textur des c-Si.

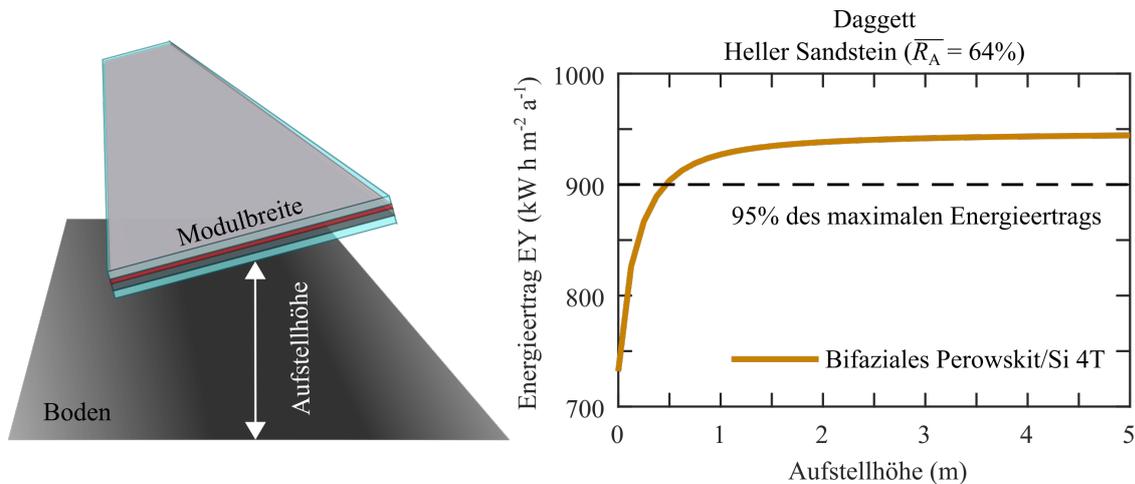


Abbildung 5.15: Links: Skizze einer Modulreihe über dem Boden und deren Schatten. Rechts: EY als Funktion der Aufstellhöhe zur Veranschaulichung der Verluste durch die Abschattung des Bodens am Ort Daggett und mit dem Untergrund heller Sandstein. Entnommen aus [108] und angepasst.

5.5 Abschattungsverluste

Durch den Schatten eines bifazialen Solarmoduls wird die Fläche am Boden reduziert, von der Albedo-Strahlung ausgeht. Auf Grundlage des in Kapitel 3.4.3 eingeführten Modells kann der Verlust durch Abschattung des Bodens abgeschätzt werden. Hierbei wird der Schatten im Fall einer Modulreihe mit unendlich langer Ausdehnung berechnet. Die Abschattung und damit der EY des Solarmoduls werden im Wesentlichen durch die Aufstellhöhe des Moduls beeinflusst. Auf die Abschattung der Solarmodule selbst durch umliegende Objekte wie beispielsweise Häuser in Städten [113] wird in dieser Arbeit nicht eingegangen.

Im verwendeten Modell wird die vom Boden ausgehende Albedo-Strahlung korrigiert. Die Beleuchtung des Bodens ist richtungsabhängig und wird unter Berücksichtigung des Schattens neu berechnet. Die Beleuchtung hängt von der Sonnenposition sowie der Intensität von direkter und diffuser Strahlung ab, wie in Kapitel 3.4.3 detailliert erläutert. Anhand der korrigierten Albedo-Strahlung kann der EY des Solarmoduls neu berechnet werden. In Abbildung 5.15 wird der EY für ein bifaziales Perowskit/Si 4T Solarmodul als Funktion der Aufstellhöhe gezeigt. In der schematischen Darstellung des Moduls in Abbildung 5.15a wird die Aufstellhöhe definiert. In Abbildung 5.15b ist der EY für eine Aufstellhöhe von 0 bis 5 m am Ort Daggett und für hellen Sandstein gezeigt. Der Verlust des EY durch Abschattung des Bodens ist für eine Aufstellhöhe von 0,4 m und höher geringer als 5% des idealen EY ohne Schatten. Für sehr kleine Aufstellhöhen fällt die Albedo-Strahlung und damit der EY stark ab, da in diesem Fall der Boden direkt unter dem Solarmodul abgeschattet wird. Denn als Lambertischer Strahler streut der Boden das Licht am stärksten in die senkrechte Richtung. Die Abnahme des EY ist für eine Aufstellhöhe des Moduls von 1 m schon relativ gering. Die Berechnung wurde für hellen Sandstein mit einer hohen Albedo $\overline{R_A}$ von 64% durchgeführt. Für Böden mit einer durchschnittlichen Albedo ist die Abnahme des EY noch geringer, da die Verluste mit der Intensität der Albedo skalieren.

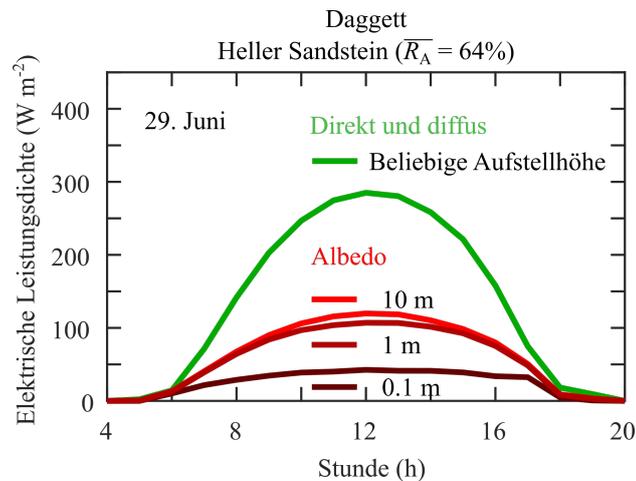


Abbildung 5.16: Darstellung der generierten elektrischen Leistungsdichte bezogen auf die Summe von direkter und diffuser Strahlung sowie auf die Albedo-Strahlung für verschiedene Aufstellhöhen des Moduls. Gezeigt wird der zeitliche Verlauf der Leistungsdichte über einen Tag (29. Juni) hinweg am Ort Daggett mit hellem Sandstein. Entnommen aus [108].

Die Anteile von direkter und diffuser Strahlung sowie von Albedo-Strahlung bei der Stromerzeugung in einem bifazialen Solarmodul sind zur Veranschaulichung in Abbildung 5.16 dargestellt. Dabei ist die erzeugte elektrische Leistungsdichte für die Aufstellhöhen 0.1 m, 1 m und 10 m eines bifazialen Perowskit/Si 4T Solarmoduls im Tagesverlauf eines ausgewählten Tages gezeigt. Der Anteil der elektrischen Leistungsdichte erzeugt durch direkte und diffuse Strahlung ist unabhängig von der Aufstellhöhe und erreicht mittags das Maximum. Hingegen wird der Anteil durch Albedo-Strahlung mit abnehmender Aufstellhöhe geringer. Mit der Abnahme des EY in Abbildung 5.15 werden demnach ausschließlich die Verluste durch Abschattung des Bodens beurteilt. Verluste durch gegenseitiges Abschatten benachbarter Modulreihen [114, 115, 116], die sich hauptsächlich auf die erzeugte Leistungsdichte durch direkte und diffuse Strahlung äußern, sind bisher kein Bestandteil des EY Modells und werden in dieser Arbeit nicht behandelt. Auch diese Verluste sind nicht beliebig groß, da der Schatten von benachbarten Modulen nur unter einem flachen Einfallswinkel des Lichts auf das Modul fällt und Abschattung der direkten Strahlung durch Module daher nur morgens und abends eine Rolle spielen, wenn die Intensität der Strahlung gering ist.

Mit dem verwendeten Modell konnten die Verluste im EY durch Abschattung des Bodens für bifaziale Solarmodule beschrieben werden. Die getrennte Behandlung von reflektierter direkter und reflektierter diffuser Strahlung (siehe Kapitel 3.4.3) ermöglicht eine präzise Berechnung der Abschattung. Für ein bifaziales Perowskit/Si 4T Solarmodul wurden Verluste geringer als 5% des maximalen EY ohne Schatten bei einer typischen Modulhöhe von 1 m [117, 118] ermittelt.

5.6 Zusammenfassung und Ausblick

Um das Potential von bifazialen Perowskit/Si Tandem-Solarmodulen abzuschätzen, wurde in diesem Kapitel das Design der Solarmodule für einige Böden mit einer Albedo von 0 bis 100%

optimiert. Hierzu wurden Architekturen basierend auf der 2T- und 4T-Verschaltung untersucht und der Ertrag mit einem monofazialen Perowskit/Si 2T Solarmodul sowie aktuellen Si-Solarmodulen verglichen. Neben der Berechnung des EY an den Orten Daggett und Portland wurde ein bedeutender Einfluss der Albedo auf das Design von bifazialen Perowskit/Si 2T Solarmodulen gezeigt.

Es wurde eine getrennte optische Analyse für die Beleuchtung der Vorder- und der Rückseite der bifazialen Solarmodule durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass Strahlung an der Rückseite ausschließlich die Absorption im c-Si erhöht und hingegen nicht den Perowskit erreicht. Die elektrische Leistung der bifazialen Perowskit/Si Tandem-Solarmodule wird durch Albedo-Strahlung erheblich gesteigert. Im Fall der 2T-Verschaltung ist eine Anpassung der Perowskit-Schichtdicke unerlässlich, um die Verluste durch Currentmismatch zu reduzieren. Daraufhin wurde das Verhalten des EY eines bifazialen Perowskit/Si 2T Solarmoduls mit der Perowskit-Bandlücke 1.72 eV für verschiedene Untergründe untersucht. Die mittlere Reflexion $\overline{R_A}$ des Bodens hat einen starken Einfluss auf die optimale Schichtdicke des Perowskits und das ideale Design weicht dabei von dem monofazialer Perowskit/Si 2T Solarmodule ab. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde gezeigt, dass der Strom in der 2T Tandem-Solarzelle bei einer Bandlücke von 1.72 eV bereits für Beton mit einer $\overline{R_A}$ von 28% durch die Perowskit-Solarzelle limitiert wird.

Die anschließende Optimierung der Perowskit-Bandlücke zeigte, dass für maximalen EY in bifazialen Perowskit/Si 2T Solarmodulen die optimale Bandlücke von der idealen Bandlücke nach der Theorie von De Vos zum Detailed balance limit [31] für monofaziale Tandem-Solarzellen abweichen kann. Bei Böden mit einer hohen Albedo wird die gesteigerte Absorption im c-Si durch eine kleinere Perowskit-Bandlücke kompensiert, da in diesem Fall das Spektrum des absorbierten Lichts in der Perowskit-Solarzelle vergrößert wird. Im Gegensatz zum Einfluss des Reflexionsgrads $\overline{R_A}$ wurde kein Einfluss des Spektrums auf die optimale Bandlücke gefunden. Auch Gras mit einer erhöhten Reflexion ab 700 nm zeigte keine Besonderheit, da im c-Si das gesamte Spektrum der Albedo-Strahlung aufgrund der hohen Absorptionskante bei 1150 nm absorbiert wird.

Beim Vergleich der 2T- und 4T-Verschaltung wurde für das bifaziale Perowskit/Si 2T Solarmodul die Architektur basierend auf beidseitig texturiertem c-Si verwendet, da diese unter allen Architekturen mit 2T-Verschaltung aufgrund der bestmöglichen Lichteinkopplung den höchsten EY erzielt. Für die 4T-Verschaltung bleibt die optimale Bandlücke des Perowskits konstant und unabhängig von $\overline{R_A}$. Auch bei einer hohen Albedo kann der erzeugte Strom in beiden Subzellen vollständig verwendet werden, da diese elektrisch unabhängig sind. Aufgrund der Verluste durch Currentmismatch bei der 2T-Verschaltung erreicht die 4T-Verschaltung für Böden mit einer $\overline{R_A} > 35\%$ einen höheren EY, wenn auch Böden mit hoher Albedo selten vorkommen. Ferner wurde durch den Vergleich des EY an den Orten Daggett und Portland festgestellt, dass unabhängig von der Verschaltung die APE der Strahlung am jeweiligen Ort einen Einfluss auf die optimale Bandlücke des Perowskits hat.

Zur Beurteilung der Verluste durch Abschattung des Bodens wurde das in Kapitel 3.4.3 beschriebene Modell implementiert und auf eine Modulreihe eines bifazialen Perowskit/Si 4T Solarmoduls angewendet. Für eine Aufstellhöhe von 1 m und höher wurden Verluste im EY von weniger als 5% relativ festgestellt. Das Modell gibt erwartungsgemäß wieder, dass die Verluste bei sehr kleinen Aufstellhöhen signifikant werden.

Seit kurzer Zeit wird von der Realisierung relativ dicker Perowskite in monolithischen Perowskit/Si 2T Tandem-Solarzellen berichtet [100], die nun eine Steigerung der Perowskit-Schichtdicke auch

in den hier untersuchten Architekturen denkbar macht. Damit könnte die Limitierung der J_{SC} bei hoher Albedo in der Perowskit-Solarzelle der 2T-Verschaltung überwunden werden. Die mit zunehmender Albedo steigende J_{SC} in der Si-Solarzelle könnte so durch eine gesteigerte Absorption in der Perowskit-Solarzelle kompensiert werden (Currentmatching). Auf diese Weise könnte für Böden mit hoher Albedo der maximale EY der bifazialen Perowskit/Si 2T Solarmodule weiter gesteigert werden. Zwar liegt die Albedo für einen Großteil der Böden, die für den Einsatz von bifazialen Solarmodulen in Frage kommen, bei bis zu 35%, aber prinzipiell sind auch Aufstellorte in der Wüste mit hellem Sandstein ($\overline{R_A} = 64\%$) sowie in Polargebieten mit Schnee ($\overline{R_A} = 88\%$) möglich.

Mit dem Simulationsmodell lassen sich zukünftig weitere Architekturen von bifazialen Perowskit/Si Tandem-Solarzellen untersuchen. Für Architekturen mit 2T-Verschaltung gibt es bereits eine weitere Studie zur Steigerung des EY im Vergleich zu Si-Solarzellen [119]. Architekturen mit einer 3T-Verschaltung, welche gegenüber der 2T-Verschaltung nicht durch Currentmismatch limitiert sind und gegenüber der 4T-Verschaltung geringere Absorptionsverluste aufgrund der drei Elektroden aufweisen, können unter realistischen Bedingungen simuliert werden. Ebenso kann das Potential von weiteren Architekturen mit 4T-Verschaltung abgeschätzt werden, um das Potential über die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Architektur mit 4T-Verschaltung hinaus zu untersuchen.

Weiter ist der Ausbau des Modells für Abschattungsverluste denkbar, um zusätzlich zur Abschattung des Bodens durch das Solarmodul den Einfluss von benachbarten Modulreihen zu berücksichtigen. Benachbarte Modulreihen reduzieren einerseits durch Abschattung des Bodens die Albedo-Strahlung und andererseits durch gegenseitiges Abschatten die Beleuchtung der Module mit direkter und diffuser Strahlung. Diese Effekte haben in der Regel eine geringere Auswirkung auf den EY von bifazialen Solarmodulen als die Abschattung des Bodens durch das Solarmodul selbst. Durch deren Berücksichtigung könnte jedoch z.B. der optimale Abstand zwischen bifazialen Solarmodulen abgeschätzt werden. Auch eine Erweiterung des Modells für die Berechnung der Abschattung für bifaziale Solarzellen mit einer anderen Bauweise oder Anordnung ist möglich. So könnte z.B. eine Analyse der Abschattungsverluste für Systeme mit ein- oder zweiachsiger Nachführung ermöglicht werden.

Mit dem vorliegenden Modell kann bereits der EY ohne die Berücksichtigung von Abschattungsverlusten für beliebig geneigte und gedrehte Solarzellen berechnet werden. Damit wäre auch die Simulation von bifazialen Solarmodulen mit vertikaler Ausrichtung möglich [116]. Auch Gebäudeintegrierte Photovoltaik (BIPV, engl. Building-integrated photovoltaics) könnte untersucht werden. Die Simulationsplattform würde zudem eine präzise Berechnung des EY für BIPV unter Berücksichtigung von Albedo-Strahlung ermöglichen. Beispielsweise der Einfluss von Albedo-Strahlung auf den EY von BIPV in Städten ist nicht geringfügig, da die Albedo von Beton bei 28% liegt und ein Großteil der Flächen in Städten versiegelt ist.

6 Organische Solarzellen mit optischem Resonator-Aufbau

Um den Anwendungsbereich der Photovoltaik auszubauen, bieten organische Solarzellen aufgrund ihrer Flexibilität [120], der Verwendung alternativer Materialien zu Si und der kostengünstigen Herstellung [16] weitere Einsatzmöglichkeiten für die Stromerzeugung. Zwar wurden bereits organische Tandem-Solarzellen mit Wirkungsgraden von bis zu 17.3% [41] realisiert, jedoch muss weiter an Konzepten zur Steigerung der Effizienz gearbeitet werden, damit organische Solarzellen auf dem Markt etabliert werden. Aufgrund der geringen Ladungsträgermobilität in organischen Systemen, ist besonders die Schichtdicke des Absorbers limitiert. Bei dickeren Schichten würden Rekombinationsverluste in der Solarzelle stark zunehmen. In den dünnen Schichten ist hingegen die Lichtabsorption unvollständig. Bisher wurden einige Konzepte zur Verbesserung des Lichtmanagements angewendet, wie beispielsweise das Einbringen von Nanopartikel-Schichten zur Lichtstreuung [17], die Strukturierung der Elektroden zur Erzeugung von Plasmon-Resonanzen [121, 122] oder die Erweiterung des Schichtstapels durch eindimensionale photonische Kristalle [123]. Ein weiteres vielversprechendes Konzept zur Steigerung der Lichtabsorption ist der Austausch des TCO durch eine dünne transparente Metallelektrode [19], welche zusammen mit der metallischen Rückelektrode die Resonanz von elektromagnetischen Wellen im Absorber ermöglicht. Die Kombination der dünnen Metallelektrode mit einem Dielektrikum ermöglicht die Resonanz einer zusätzlichen fundamental verschiedenen Frequenz im Resonator-Aufbau. Durch präzises Einstellen der Schichtdicken kann die Lichtabsorption auf Basis dieser beiden Resonanzfrequenzen über ein breites Spektrum hinweg gesteigert werden. Bisher wurde der Effekt an organischen Solarzellen unter STC untersucht. Auch numerische Berechnungen wurden nur unter senkrechtem Lichteinfall durchgeführt [20]. In diesem Kapitel wird die Architektur einer organischen Solarzelle mit optischem Resonator-Aufbau auf Basis des Absorbers PTB7-Th:PC₇₁BM für senkrechten Lichteinfall und weiterführend für schrägen Lichteinfall untersucht und mit einer konventionellen Architektur für organische Solarzellen verglichen. Nach einer optischen Analyse der Lichtabsorption in den Architekturen wird der Effekt zunächst unter STC demonstriert sowie die Abhängigkeit der generierten J_{SC} von der Schichtdicke des Absorbers untersucht. Es folgt die Untersuchung der J_{SC} für schrägen Lichteinfall. Anschließend werden die Auswirkungen auf den EY gezeigt und das Verhalten des EY unter Neigung der Solarzelle analysiert. Anhand der Optimierung des Schichtstapels für schrägen Lichteinfall wird schließlich die maximal mögliche Steigerung der Lichtabsorption gezeigt.

Ein Großteil der Ergebnisse aus diesem Kapitel wurde im referierten Fachjournal **Optics Express**, **28, 25, 37986-37995, (2020)** veröffentlicht [124]. Diese Ergebnisse sind in den entsprechenden Abbildungen mit Quellennachweis gekennzeichnet.

6.1 Resonator-Aufbau

Zu Beginn wird der Resonator-Aufbau der organischen Solarzelle behandelt, um dann den Mechanismus für die Verstärkung der Lichtabsorption zu schildern. Zunächst werden die Architekturen der Solarzelle mit Resonator und der konventionellen Solarzelle vorgestellt. Auf dieser Basis kann dann die Steigerung der Lichtabsorption durch die Resonanz von elektromagnetischen Wellen im Absorber des Resonator-Aufbaus eingegangen werden. Der Effekt der Verstärkung wird anhand der Verteilung des elektrischen Felds für einzelne Wellenlängen demonstriert. In dem vorliegenden Aufbau können zwei fundamental verschiedene Resonanzfrequenzen verstärkt werden. Da die spektrale Breite der Verstärkung beider Frequenzen aufgrund des vorliegenden Aufbaus im Vergleich zu einem idealen Resonator relativ groß ausfällt, kann durch die Anpassung der dünnen Metallelektrode eine Überlappung der spektralen Bereiche erreicht werden. Durch Optimierung des Schichtstapels kann die Lichtabsorption maximiert werden. Für die optimale Schichtkonfiguration des Resonator-Aufbaus wird eine optische Analyse der spektralen Absorption unter senkrechtem Lichteinfall durchgeführt und mit der Absorption in der konventionellen Solarzelle verglichen, um die allgemeine Steigerung des Light-Trappings in der Solarzelle zu demonstrieren.

6.1.1 Architekturen

Für die Analyse von organischen Solarzellen mit Resonator wird der Schichtaufbau des Bauteils aus der Studie von Liu *et al.* [20] verwendet. Dabei wird die Abfolge der Schichten beibehalten und eine geringfügige Anpassung der Schichtdicken von Absorber und Dielektrikum vorgenommen, um die generierte J_{SC} unter senkrechtem Lichteinfall zu maximieren. Der Schichtstapel der Solarzelle ist in Abbildung 6.1a dargestellt. Die Abfolge der Schichten mit Angabe der Schichtdicken ist MgF_2 (100 nm)/Glas (1 mm)/ TiO_2 (35 nm)/ZnO (5 nm)/Ag (10 nm)/ZnO (5 nm)/ZnO Sol-Gel (10 nm)/PTB7-Th:PC₇₁BM (0-300 nm)/ MoO_3 (5 nm)/Ag (100 nm). Die Schichtdicke des ARC sowie eines Großteils der anderen Schichten sind bereits optimiert. Die ermittelte optimale Dicke der Absorberschicht beträgt 90 nm und weicht geringfügig von der verwendeten Schichtdicke in der Arbeit von Liu *et al.* [20] ab. Die Dicke des Dielektrikums TiO_2 wurde entsprechend angepasst. Die ZnO-Schichten sind für die Qualität der Elektrode im realen Bauteil entscheidend und sorgen zum einen für die Verbesserung der elektrischen Eigenschaften und vermeiden zum anderen die Degradation von Ag unter dem Einfluss von Luft [20]. Die ZnO-Schichten wurden aus Gründen der Vollständigkeit bei der Simulation des Schichtstapels berücksichtigt.

Die vorgestellte Architektur wird im Folgenden mit dem konventionellen Aufbau einer organischen Solarzelle verglichen. In Abbildung 6.1b ist der entsprechende Schichtstapel des Referenzbauteils gezeigt. Die Solarzellen unterscheiden sich ausschließlich in der transparenten Elektrode. Der Schichtstapel des Referenzbauteils ist MgF_2 (90 nm)/Glas (1 mm)/ITO (70 nm)/ZnO Sol-Gel (10 nm)/PTB7-Th:PC₇₁BM (0-300 nm)/ MoO_3 (5 nm)/Ag (100 nm). Das ARC wurde angepasst, um die generierte J_{SC} der Solarzelle unter senkrechtem Lichteinfall zu maximieren. Für die Elektrode wird aufgrund der guten optischen und elektrischen Eigenschaften ITO gewählt. Für die optische Simulation der Solarzellen wird wie bisher die Transfer-Matrix-Methode verwendet und die Lichtausbreitung im dicken Glassubstrat wird mittels Vielfach-Reflexion berechnet. Die Methoden der optischen Simulation wurden in Kapitel 3.2.1 beschrieben.

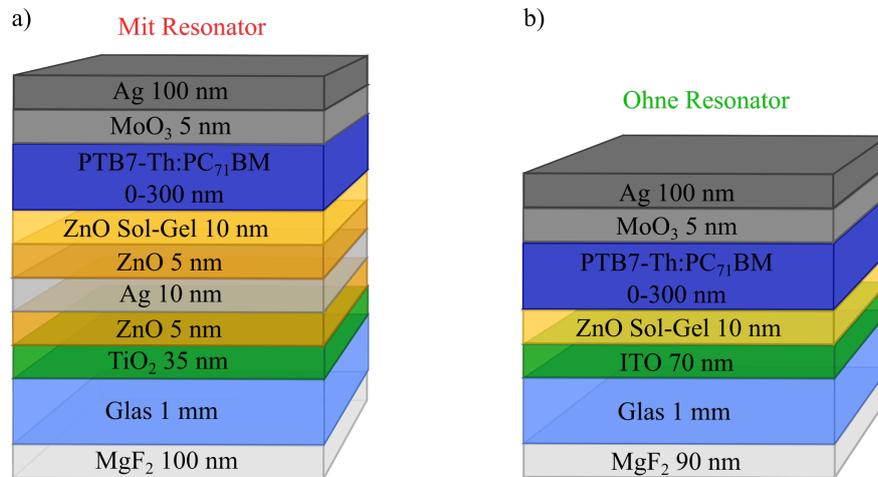


Abbildung 6.1: a) Architektur der organischen Solarzelle mit Resonator und b) konventionelle Architektur einer organischen Solarzelle ohne Resonator-Aufbau.

6.1.2 Verstärkung der Absorption

Die Verstärkung der Lichtabsorption durch den Resonator-Aufbau wurde in der Publikation von Liu *et al.* [20] im Detail beschrieben. Bei einem Großteil der Ausführungen in diesem Kapitel 6.1.2 handelt es sich um die Wiedergabe dieser Inhalte in eigenen Worten. Die Ausführungen in diesem Kapitel dienen zum Verständnis der folgenden Ergebnisse.

Die Verstärkung in der Lichtabsorption für die Architektur mit Resonator im Vergleich zu einer konventionellen Architektur ist auf die Resonanz von elektromagnetischen Wellen im Absorber zurückzuführen. Zur Beschreibung der Verstärkung wird im Folgenden das elektrische Feld betrachtet. Im Fall eines idealen optischen Resonators mit einem hoch reflektierenden Spiegel und einem halbdurchlässigen Spiegel kommt es durch konstruktive Interferenz zum Ausbilden von Resonanzfrequenzen. Jeder Resonanzfrequenz kann eine Wellenlänge zugeordnet werden. Die Bedingung für Resonanz ist dabei durch den Abstand der Spiegel und durch den Brechungsindex des eingeschlossenen Mediums festgelegt. Im Resonanzfall entspricht die Phase einer elektromagnetischen Welle nach einem Durchlauf wieder der ursprünglichen Phase und der doppelte Abstand der Spiegel entspricht einem Vielfachen der Wellenlänge im Medium. Tritt an die Stelle des halbdurchlässigen Spiegels ein Dielektrikum, ändert sich die Resonanzbedingung. Im Dielektrikum ist die Intensität des elektrischen Felds maximal, hingegen nimmt die Intensität im Metall stark ab.

Um das Prinzip des hier verwendeten Resonator-Aufbaus zu verdeutlichen, wird der Verlauf der Intensität des elektrischen Felds im Schichtstapel betrachtet. Zur Verdeutlichung des Effekts wird anstelle der Absorberschicht eine idealisierte Schicht ohne Absorption ($n = 2$, $k = 0$) verwendet. In Abbildung 6.2 ist die Intensität des elektrischen Felds als Funktion der Position im Schichtstapel unter senkrechtem Lichteinfall für die Wellenlängen 440 nm und 655 nm dargestellt. Hierbei wurde der Schichtstapel in der Konfiguration (1) ohne dünne Metallelektrode ($d_{\text{Ag}} = 0$ nm) berechnet. In Abbildung 6.3 ist die Konfiguration (2) mit dünner Metallelektrode der Dicke $d_{\text{Ag}} = 15$ nm gezeigt. In Konfiguration (1) ist die Intensität des elektrischen Felds bei der Wellenlänge 440 nm ausgeprägt

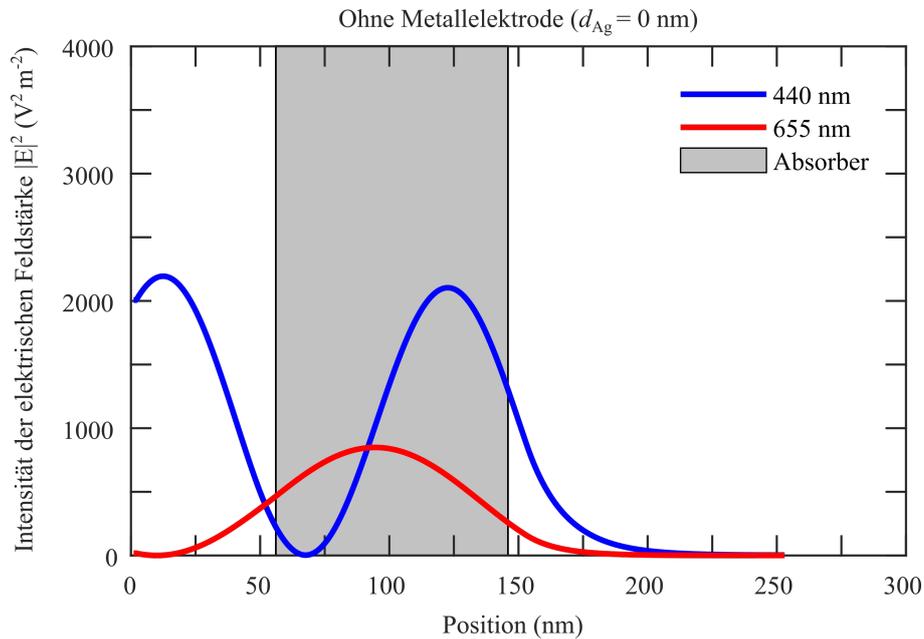


Abbildung 6.2: Darstellung der Intensität des elektrischen Felds in der Konfiguration (1) ohne dünne Metallelektrode für die Architektur mit Resonator. Der Verlauf ist für die Wellenlängen 440 nm und 655 nm gezeigt. Anstelle des Absorbers wurde eine idealisierte Schicht ($n = 2$, $k = 0$) verwendet, um die Verstärkung der Intensität zu verdeutlichen.

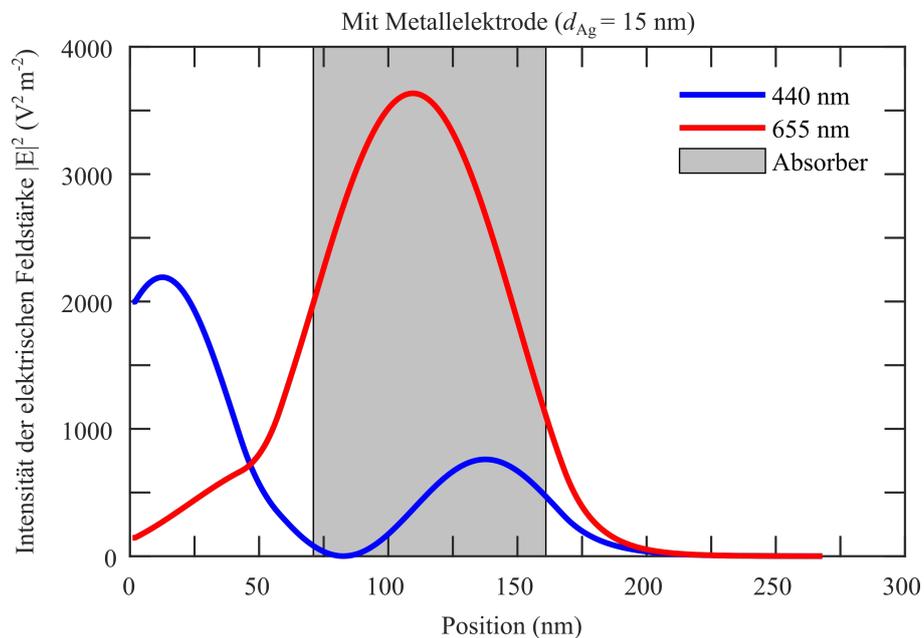


Abbildung 6.3: Darstellung der Intensität des elektrischen Felds in der Konfiguration (2) mit dünner Metallelektrode ($d_{Ag} = 15$ nm) für die Architektur mit Resonator. Der Absorber wurde durch eine idealisierte Schicht ($n = 2$, $k = 0$) ersetzt, um die Verstärkung der Intensität zu verdeutlichen.

und hingegen in Konfiguration (2) bei der Wellenlänge 655 nm. Der Effekt der Feldverstärkung wirkt sich auf einen breiten Spektralbereich aus, da es sich bei dem vorliegenden Bauteil nicht um einen Resonator handelt und keine näherungsweise idealen Spiegel vorliegen. In beiden Konfigurationen bleibt der Effekt der Feldverstärkung auch unter Variation von d_{Ag} erkennbar, aber ist mit zunehmender Abweichung von der ursprünglichen Dicke schwächer ausgeprägt. Bei einer geeigneten Wahl von d_{Ag} im Bereich von 0 - 15 nm kann die Feldverstärkung beider Resonanzfrequenzen kombiniert werden. Die optimale Verstärkung liegt bei $d_{Ag} = 10$ nm.

6.1.3 Optische Analyse

Zur Demonstration der Steigerung in der Lichtabsorption wird die Solarzelle mit Resonator mit dem Referenzbauteil verglichen. Hierzu ist die optische Analyse beider Architekturen in Abbildung 6.4 für senkrechten Lichteinfall dargestellt. Dabei wurde die spektrale Absorption in allen Schichten bei einer Schichtdicke des Absorbers PTB7-Th:PC₇₁BM von 90 nm berechnet. Im Referenzbauteil ist die Absorption in PTB7-Th:PC₇₁BM im Bereich bis zu einer Wellenlänge von etwa 500 nm höher aufgrund geringerer Reflexionsverluste. Bei Wellenlängen größer 500 nm überwiegt jedoch die Absorption in der Architektur mit Resonator deutlich. Das erhöhte Light-Trapping ist auf die in Kapitel 6.1.2 beschriebene Verstärkung der zwei Resonanzfrequenzen zurückzuführen. Die Optimierung der dünnen Metallelektrode führt zur Steigerung der Lichtabsorption über einen großen spektralen Bereich hinweg. Für einen direkten Vergleich der Lichtabsorption in den Absorbern beider Architekturen sind die Spektren in Abbildung 6.5 übereinander gelegt. Die Verstärkung im Bereich 500-750 nm ist gut erkennbar.

6.2 Leistung unter senkrechtem Lichteinfall

Die Leistung der Solarzelle kann vereinfachend anhand der generierten J_{SC} und des Wirkungsgrads demonstriert werden. Um die Effizienz der Bauteile zunächst unter STC zu bewerten, werden die Architekturen in diesem Kapitel unter senkrechtem Lichteinfall verglichen. Da die organische Solarzelle mit Resonator aufgrund der metallischen Elektrode einen geringeren R_S als die konventionelle Solarzelle mit ITO-Elektrode aufweist, fällt die Steigerung des Wirkungsgrads noch größer als die Steigerung der J_{SC} aus. Nach der Beschreibung der elektrischen Kenngrößen werden die J_{SC} und der Wirkungsgrad für beide Solarzellen berechnet. Schließlich wird das Verhalten der Größen als Funktion der Schichtdicke des Absorbers gezeigt, um die notwendige Präzision im Design des Resonator-Aufbaus zu verdeutlichen.

6.2.1 Elektrische Kenngrößen

Für die Berechnung der elektrischen Kenngrößen wird das Eindiodenmodell verwendet, welches in Kapitel 3.3.1 vorgestellt wurde. Die verwendeten elektrischen Parameter J_0 , n und R_S für die Bauteile sind in Tabelle 6.1 aufgeführt. Die Wahl der Parameter orientiert sich an den elektrischen Kenngrößen der realen Bauteile aus der Literatur [20]. Der R_S im realen Bauteil mit ITO-Elektrode ist doppelt so groß wie im Bauteil mit dünner Metallelektrode. Infolgedessen ist der FF der Solarzelle mit Resonator etwas größer. In Tabelle 6.2 sind die elektrischen Kenngrößen für beide Solarzellen zusammengefasst. Die berechneten J - U -Kennlinien sind in Abbildung 6.6 dargestellt. Um die elektrischen Verluste in der organischen BHJ durch Rekombination von

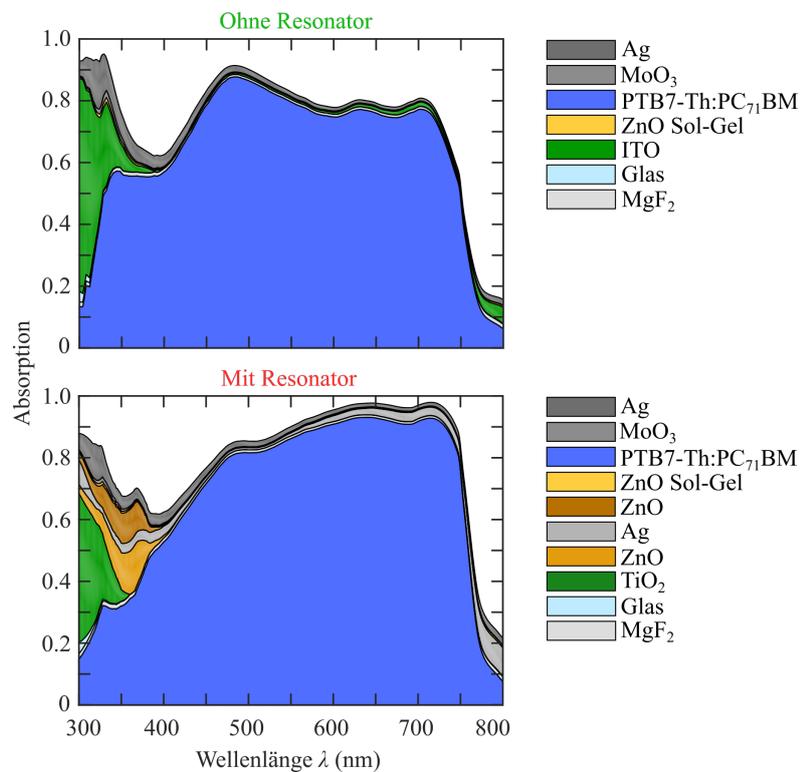


Abbildung 6.4: Spektrale Absorption für alle Schichten im Schichtstapel der konventionellen Architektur sowie der Architektur mit optischem Resonator-Aufbau. Entnommen aus [124] und angepasst.

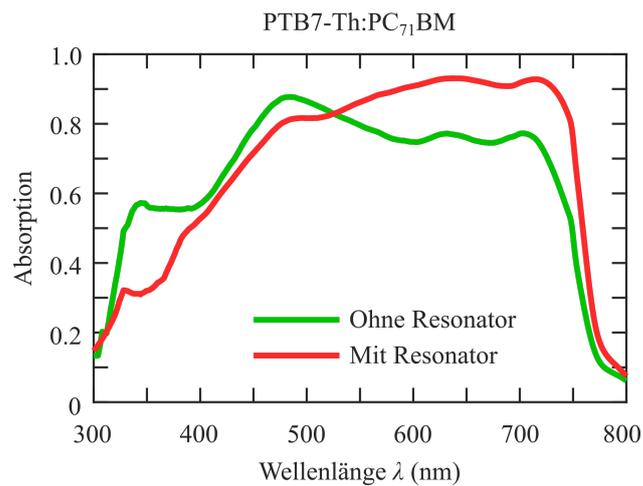


Abbildung 6.5: Direkter Vergleich der spektralen Absorption in PTB7-Th:PC₇₁BM für beide Architekturen. Entnommen aus [124].

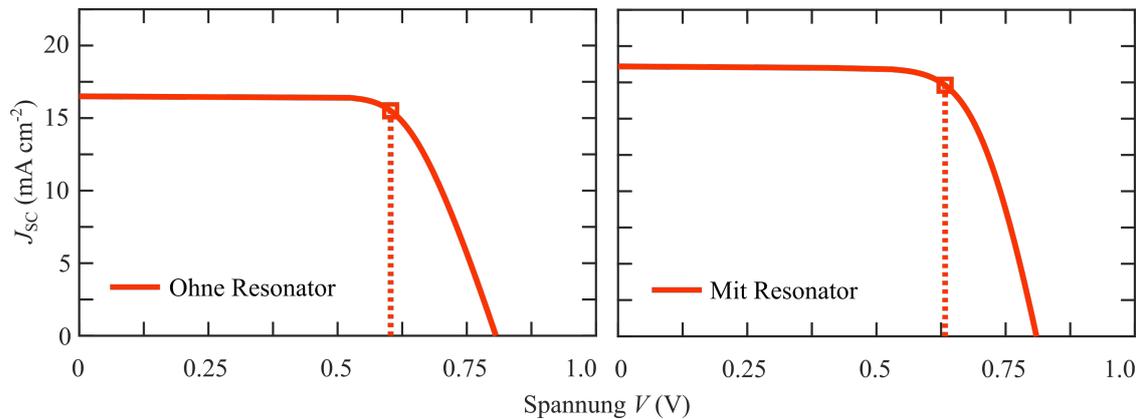


Abbildung 6.6: Darstellung der berechneten J - U -Kennlinien unter STC für beide Solarzellen mit und ohne Resonator. Entnommen aus [124].

Exzitonen und von freien Ladungsträgern zu berücksichtigen, wurde bei der Berechnung der J_{SC} eine Sammlungseffizienz von 90% angenommen. Bei der Berechnung der J_{SC} wird entsprechend die Zahl der generierten Ladungsträger mit dem Faktor 0.9 multipliziert, um die Zahl der zur J_{SC} beitragenden Ladungsträger zu bestimmen.

Solarzelle	J_0 (mA cm^{-2})	n	R_S (Ω)
Ohne Resonator	$3.5 \cdot 10^{-11}$	1.2	7.7
Mit Resonator	$3 \cdot 10^{-8}$	1.6	3.9

Tabelle 6.1: Elektrische Parameter der organischen Solarzellen zur Berechnung der J - U -Kennlinie mit dem Eindiodenmodell.

Solarzelle	V_{OC} (V)	FF	J_{SC} (mA cm^{-2})	η
Ohne Resonator	0.81	0.70	16.8	9.4%
Mit Resonator	0.81	0.73	18.7	11.0%

Tabelle 6.2: Berechnete Kenngrößen mit dem Eindiodenmodell für die Solarzelle ohne Resonator sowie die Solarzelle mit Resonator.

6.2.2 Einfluss der Schichtdicke

Die Architektur der Solarzelle mit Resonator ist präzise an die Schichtdicke des Absorbers angepasst, um eine maximale Steigerung des Light-Trappings zu erzielen. Bereits geringe Abweichungen von dem idealen Design führen zu Verlusten in der Absorption. Wird beispielsweise die Schichtdicke des Absorbers geändert, steigen die optischen Verluste. In Abbildung 6.7 ist die generierte J_{SC} für beide Architekturen als Funktion der Schichtdicke von PTB7-Th:PC₇₁BM dargestellt. Bei einer Schichtdicke von 90 nm erreicht die Solarzelle mit Resonator ihre maximale relative Steigerung von 11% in J_{SC} gegenüber der konventionellen Solarzelle. Die Solarzelle mit Resonator erreicht eine J_{SC} von 18.7 mA cm^{-2} , wohingegen die konventionelle Solarzelle 16.8 mA cm^{-2} erreicht. Für deutlich kleinere oder größere Schichtdicken von PTB7-Th:PC₇₁BM

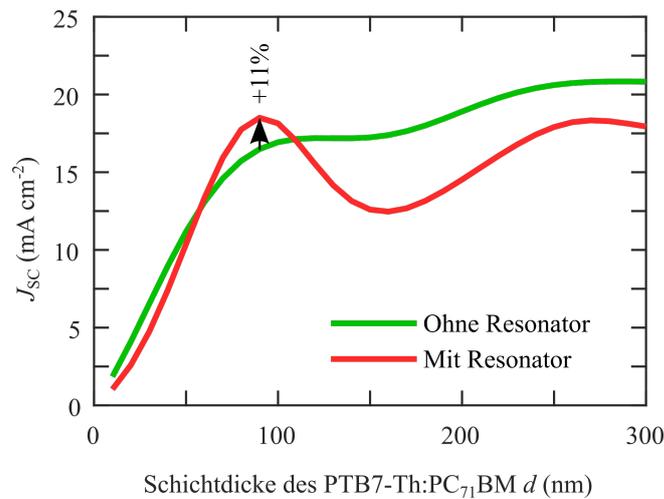


Abbildung 6.7: Darstellung der J_{SC} als Funktion der Schichtdicke von PTB7-Th:PC₇₁BM für beide Architekturen unter senkrechtem Lichteinfall.

überwiegt jedoch die Lichtabsorption in der konventionellen Solarzelle, da hier der Schichtstapel des Resonator-Aufbaus nicht mehr an die Schichtdicke des Absorbers angepasst ist.

Die relative Steigerung des Wirkungsgrads fällt für die Architektur mit Resonator noch größer aus, da der R_S der Solarzelle aufgrund der metallischen Elektrode deutlich geringer als im Aufbau mit ITO-Elektrode ist. Zur Verdeutlichung wird der Wirkungsgrad in Abbildung 6.8 in Abhängigkeit der Schichtdicke des Absorbers dargestellt. Bei der Schichtdicke von 90 nm steigt der Wirkungsgrad der Solarzelle um 17% relativ von $\eta = 9.4\%$ für die konventionelle Solarzelle auf $\eta = 11.0\%$ für die Solarzelle mit Resonator. Der Wirkungsgrad verhält sich weitestgehend proportional zur J_{SC} . Daher ist auch die berechnete Effizienz der Solarzelle mit Resonator für deutlich kleinere und größere Schichtdicken aufgrund der optischen Verluste geringer als bei der konventionellen Solarzelle, da der Schichtstapel dann nicht mehr angepasst ist. In dickeren Schichten nehmen zudem die Rekombinationsverluste aufgrund der geringen Mobilität von Ladungsträgern in organischen Schichten stark zu. Die Änderung der elektrischen Eigenschaften kann in diesem Modell nicht berücksichtigt werden. Der berechnete Wirkungsgrad in Abbildung 6.8 ist daher nur für Schichtdicken im Bereich von bis zu 100 nm valide und fällt für größere Schichtdicken ab. Jedoch kann angenommen werden, dass die elektrischen Verluste für beide Architekturen bei größeren Schichtdicken vergleichbar sind.

6.3 Leistung unter schrägem Lichteinfall

Die Steigerung der Lichtabsorption durch den Resonator-Aufbau wurde im vorigen Kapitel 6.2 unter senkrechtem Lichteinfall gezeigt. Unter schrägem Lichteinfall ändert sich der effektive Lichtweg im Absorber und daher muss geprüft werden, in welchem Maß die Resonanzbedingungen für konstruktive Interferenz im vorliegenden Schichtstapel erfüllt sind, der für senkrechten Lichteinfall konzipiert wurde. Anhand des Simulationsmodells kann die Lichtabsorption unter schrägem Lichteinfall untersucht werden. Hierzu werden die J_{SC} in Abhängigkeit des Einfallswinkels sowie der EY der Solarzelle berechnet und mit der konventionellen Architektur verglichen.

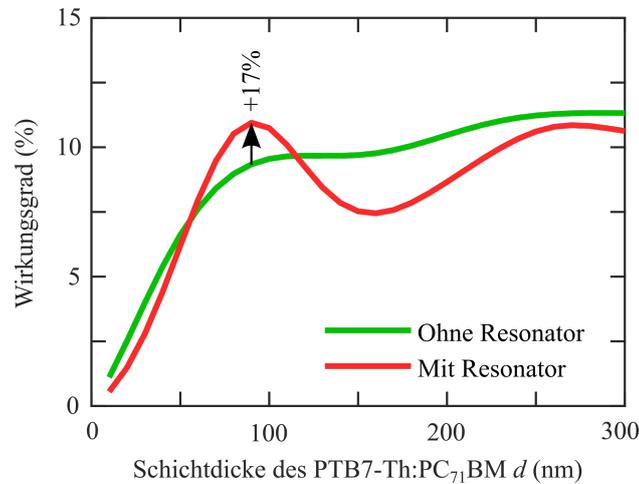


Abbildung 6.8: Berechneter Wirkungsgrad der Architektur mit Resonator und der konventionellen Architektur als Funktion der Schichtdicke von PTB7-Th:PC₇₁BM unter STC.

Die Lichtabsorption kann gut anhand der J_{SC} des Bauteils wiedergegeben werden. Somit lässt sich die winkelabhängige Absorption in PTB7-Th:PC₇₁BM in beiden Bauteilen vereinfachend für jeden Einfallswinkel vergleichen. Der EY der Solarzellen wird für verschiedene Orte berechnet, um die Performance unter realistischen Bedingungen zu demonstrieren. Anhand des EY kann die Performance der Solarzelle mit Resonator unter der Lichtverteilung von direkter und diffuser Einstrahlung abgeschätzt werden. Anschließend wird das Verhalten des EY für eine beliebige Orientierung der Solarzelle mit Resonator untersucht. Dabei wird der Neigungswinkel sowie der Rotationswinkel der Solarzelle verändert. Der ursprünglich für senkrechten Lichteinfall konzipierte Schichtstapel wird schließlich für jeden Einfallswinkel optimiert, um das gesamte Potential der Architektur abzuschätzen.

6.3.1 Kurzschlussstromdichte

Die Berechnung der winkelabhängigen J_{SC} ermöglicht eine einfache Analyse der Lichtabsorption unter schrägem Lichteinfall und liefert eine Abschätzung der realen Lichteinkopplung in den Bauteilen. Den Ausgangspunkt hierfür bietet die Simulation der winkelabhängigen Lichtabsorption mit dem Modul Optik des EY Modells. Aus der winkelabhängigen Lichtabsorption wird die generierte J_{SC} des Bauteils für jeden Winkel unter der Einstrahlung des AM1.5g Spektrums berechnet. In Abbildung 6.9 ist die effektive J_{SC} der Solarzelle mit Resonator und des Referenzbauteils bei einer Schichtdicke des PTB7-Th:PC₇₁BM von 90 nm gezeigt. Anhand der effektiven J_{SC} wird die Änderung der effektiven Fläche der Solarzelle unter schrägem Lichteinfall berücksichtigt. Mit flacherem Einfallswinkel nimmt die effektive Fläche der Solarzelle, auf welche die Strahlung einfällt, mit dem Faktor $\cos(\theta)$ ab. Die effektive J_{SC} wird somit aus der J_{SC} über

$$J_{SC}^* = \frac{J_{SC}}{\cos(\theta)} \quad (6.1)$$

berechnet. Der Vergleich beider Architekturen zeigt, dass die effektive J_{SC} der Solarzelle mit Resonator im gesamten Winkelbereich größer als die J_{SC} der konventionellen Solarzelle ist. Für

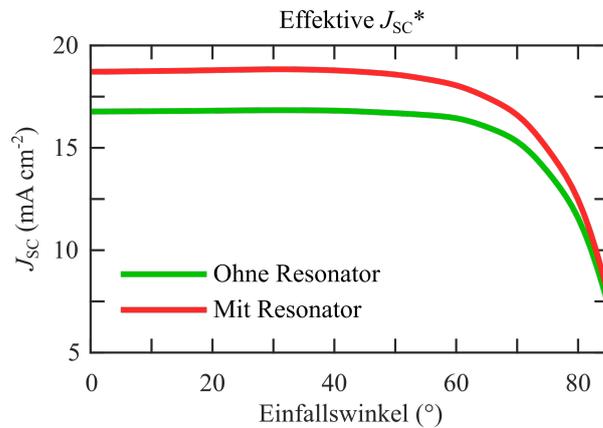


Abbildung 6.9: Darstellung der effektiven J_{SC} als Funktion des Einfallswinkels für die Architektur mit Resonator und für das Referenzbauteil. Zur Berechnung der effektiven J_{SC} wird für jeden Einfallswinkel das AM1.5g Spektrum verwendet. Entnommen aus [124].

senkrechten Lichteinfall (0°) ist die relative Steigerung der effektiven J_{SC} 11% und für schrägen Lichteinfall bleibt die relative Steigerung $> 6\%$ für den gesamten Winkelbereich. Das Ergebnis zeigt, dass die Lichtabsorption auch bei schrägen Einfallswinkeln für den Resonator-Aufbau der organischen Solarzelle im Vergleich zu einer konventionellen Solarzelle steigt. Das Light-Trapping kann somit insgesamt durch konstruktive Interferenz der elektromagnetischen Wellen im Absorber gesteigert werden. Auch unter einem längeren effektiven Lichtweg im Absorber unter schrägem Lichteinfall wird ein Großteil des Lichts im optischen Bereich verstärkt.

6.3.2 Energieertrag

Mit dem EY Modell wird im Folgenden die Architektur mit Resonator unter realistischen Bedingungen evaluiert. Damit kann die relative Steigerung des EY im Vergleich zur konventionellen Architektur berechnet werden. Bei der Analyse des EY wird insbesondere der Einfluss einer realistischen Lichtverteilung berücksichtigt. Die diffuse Einstrahlung trifft beispielsweise aus allen Richtungen gleichzeitig auf die Solarzelle. Weiter gehen auch die Einflüsse der Intensität sowie des Spektrums der Einstrahlung in die Berechnungen ein. Der EY wird für fünf Orte mit unterschiedlichen klimatischen Zonen simuliert. Die Orte und Klimazonen sind Detroit (Michigan) mit kaltem gemäßigttem Klima, Miami (Florida) mit subtropischem Klima, Nashville (Tennessee) mit heißem gemäßigttem Klima, Phoenix (Arizona) mit Wüstenklima und Portland (Oregon) mit warmem gemäßigttem Klima. Der EY ist in Abbildung 6.10 für beide Architekturen bei einer Schichtdicke des PTB7-Th:PC₇₁BM von 90 nm dargestellt. Der Neigungswinkel der Solarzelle ist optimiert und die Solarzelle ist nach Süden ausgerichtet. Der EY der Architektur mit Resonator ist für alle Orte höher als für die konventionelle Architektur und die relative Steigerung im EY ist 11-14%. Die relative Steigerung ist aufgrund der unterschiedlichen Einstrahlung ortsabhängig und ist für jeden Ort in Abbildung 6.10 angegeben. Die relative Steigerung des EY unter realistischen Bedingungen fällt im Vergleich zur Steigerung des Wirkungsgrads unter STC (Kapitel 6.2.2) geringer aus. Der Grund hierfür liegt darin, dass die Steigerung in der Lichtabsorption durch den Resonator-Aufbau für schräge Einfallswinkel abnimmt, wie in Abbildung 6.9 veranschaulicht wurde. Unter realistischen Bedingungen fällt nur ein Anteil der Strahlung senkrecht auf die

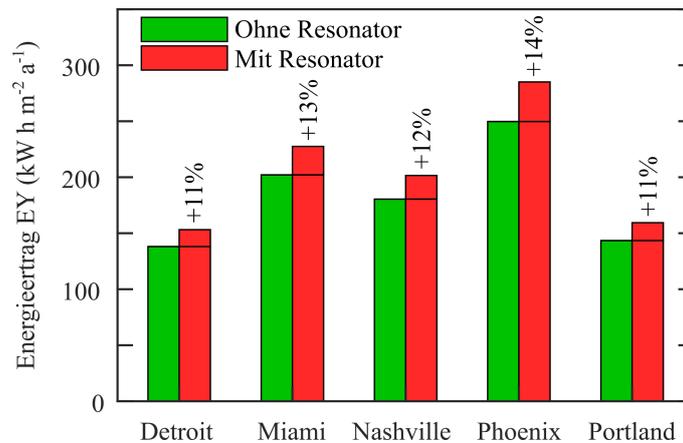


Abbildung 6.10: Maximaler EY für die Architekturen mit und ohne Resonator für fünf Orte in verschiedenen klimatischen Zonen. Der Neigungswinkel der Solarzelle ist für jeden Ort optimiert. Entnommen aus [124] und angepasst.

Solarzelle. Die Berechnung des EY zeigt, welche Steigerung durch den Resonator-Aufbau für reale Bauteile zu erwarten ist.

Im Folgenden wird der EY der Solarzelle mit Resonator in Abhängigkeit der Orientierung untersucht. Hierbei wird der EY für verschiedene Neigungswinkel und verschiedene Drehungen der Solarzelle simuliert. Die Berechnung wird für beliebige Ausrichtungen der Solarzelle von ostwärts über südwärts nach westwärts durchgeführt. Dabei wird die Einstrahlung am Ort Phoenix verwendet. Das Ergebnis ist in Abbildung 6.11 dargestellt. Der optimale Neigungswinkel ist 25° und die optimale Ausrichtung ist wie erwartet nahezu südwärts. Um die Robustheit der Architektur gegenüber der Neigung und Drehung der Solarzelle zu veranschaulichen, sind in der Darstellung Konfidenzintervalle aufgeführt. Der EY der Solarzelle bleibt für einen großen Bereich des Neigungswinkels sowie für einen großen Bereich des Drehwinkels bei über 95% des maximalen EY für eine optimal ausgerichtete Solarzelle. Daraus kann geschlossen werden, dass die Architektur mit Resonator robust ist und auch hohe EY erzielt werden können, wenn die Solarzelle nicht optimal ausgerichtet ist.

6.3.3 Optimierung der Architektur

Bisher wurde die Analyse für einen Schichtstapel durchgeführt, der für senkrechten Lichteinfall optimiert ist. Die optischen Verluste des Schichtstapels nehmen für Licht unter flacherem Einfallswinkel zu. Ein Grund ist die zunehmende Reflexion von Licht am planaren Schichtstapel für flachere Einfallswinkel. Ein weiterer Grund liegt darin, dass der Schichtstapel nicht für die Lichtabsorption im PTB7-Th:PC₇₁BM unter schrägem Lichteinfall optimiert ist. Um die maximale Lichtabsorption in der Architektur auch für schrägen Einfall zu ermitteln, wird der Schichtstapel für jeden Einfallswinkel unter Beleuchtung mit dem AM1.5g Spektrum optimiert. Dabei werden die Schichtdicken der drei optisch relevanten Schichten variiert. Diese Schichten sind die dünne Metallelektrode aus Ag (5-15 nm), das Dielektrikum aus TiO₂ (10-50 nm) und das ARC aus MgF₂ (90-110 nm). Die Schichtdicke des Absorbers PTB7-Th:PC₇₁BM von 90 nm wird beibehalten. In Abbildung 6.12 ist die effektive J_{SC} als Funktion des Einfallswinkels dargestellt.

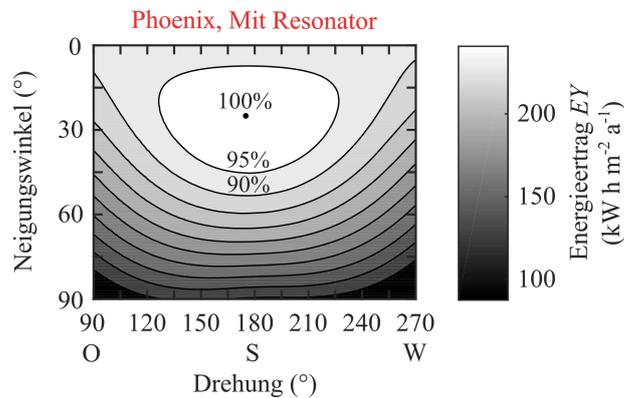


Abbildung 6.11: EY der Solarzelle mit Resonator als Funktion des Neigungswinkels und der Drehung der Solarzelle. Der EY wurde für den Ort Phoenix berechnet. Entnommen aus [124].

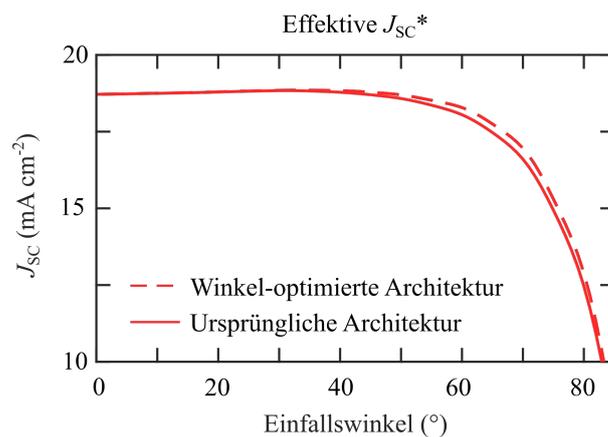


Abbildung 6.12: Darstellung der effektiven J_{SC} als Funktion des Einfallswinkels. Hierbei wird die effektive J_{SC} der ursprünglichen Architektur verglichen mit der maximalen effektiven J_{SC} , die durch Optimierung der Architektur für jeden Einfallswinkel erreicht werden kann. Entnommen aus [124].

Zum einen ist die effektive J_{SC} der ursprünglichen Architektur gezeigt und zum anderen wurde der Schichtstapel für jeden Einfallswinkel in Schritten von 1° von 0 bis 89° optimiert. Die maximale relative Steigerung von 4% gegenüber der ursprünglichen Architektur wird für Einfallswinkel im Bereich von 80° erreicht. Wie zu erwarten, ist die ursprüngliche Architektur bereits für senkrechten Lichteinfall sowie kleine Einfallswinkel optimiert. Aus der Optimierung der Architektur kann geschlossen werden, dass für flache Einfallswinkel ein Potential zur Steigerung gegeben ist, jedoch die ursprüngliche Architektur bereits eine insgesamt hohe winkelabhängige Lichtabsorption erzielt.

6.4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Analyse der organischen Solarzelle mit Resonator-Aufbau hat gezeigt, dass dieses Konzept ein Potential zur Steigerung der Bauteileffizienz durch verbessertes Light-Trapping birgt. Bereits die Architektur mit einem Resonator-Aufbau, der für senkrechten Lichteinfall optimiert wurde, zeigt eine erhöhte Lichtabsorption unter schrägem Lichteinfall. Der Verstärkungseffekt durch den Resonator kommt auch für schräge Einfallswinkel zum Tragen. Zudem führen die verbesserten optischen Eigenschaften des Bauteils zu einer Steigerung des EY unter realistischen Bedingungen. In diesem Kapitel wurde zunächst auf den Schichtaufbau einer organischen Solarzelle mit Resonator eingegangen, um die Wirkungsweise und die Besonderheiten des hier verwendeten Resonator-Aufbaus zu erläutern. Nachdem das Prinzip der Verstärkung des elektrischen Felds in diesem Aufbau verdeutlicht wurde, wurde zunächst eine Analyse der spektralen Lichtabsorption für senkrechten Lichteinfall durchgeführt. Um die Steigerung in der Lichtabsorption zu verdeutlichen, wurde die Solarzelle mit einem Referenzbauteil verglichen, das an der transparenten Seite anstelle der Kombination aus dünner Metallelektrode und Dielektrikum eine gewöhnliche ITO-Elektrode aufweist. Die Steigerung der Bauteileffizienz wurde anhand der Berechnung und Simulation der J_{SC} und des Wirkungsgrads demonstriert.

Anhand der Berechnung der winkelabhängigen Lichtabsorption für beide Bauteile mit dem optischen Modul des EY Modells konnten die Schichtstapel für schrägen Lichteinfall ausgewertet werden. Dabei wurde die effektive J_{SC} beider Bauteile für alle Einfallswinkel von 0 bis 90° verglichen. Die Architektur mit Resonator ist für alle Einfallswinkel der konventionellen Architektur klar überlegen. Aufgrund der gesteigerten Lichtabsorption über den gesamten Winkelbereich hinweg wird auch der EY des Bauteils durch den Resonator-Aufbau gesteigert. Die relative Steigerung des EY beträgt 11-14% je nach der Intensitäts- und Winkelverteilung der Einstrahlung am Ort. Die Steigerung des EY unter realistischen Bedingungen fällt etwas geringer aus als die Steigerung des Wirkungsgrads (17% relativ) unter STC. Unter realistischen Bedingungen trifft ein nicht unwesentlicher Anteil der Strahlung unter einem flachen Einfallswinkel auf die Solarzelle auf. Unter flachen Einfallswinkeln fällt wiederum die Wirkung des Resonator-Aufbaus geringer aus. Zudem wurde das Verhalten des EY unter Neigung und Drehung der Solarzelle untersucht. Es konnte demonstriert werden, dass der EY über einen großen Winkelbereich hinweg über 95% des maximalen EY erreicht. Die Solarzelle mit Resonator zeigt demnach eine gute Robustheit und erreicht auch dann hohen EY, wenn bei der Installation der Solarzelle keine optimale Ausrichtung möglich ist.

Die Optimierung des Resonator-Aufbaus für schrägen Lichteinfall hat gezeigt, dass bereits der ursprüngliche Schichtstapel, der für senkrechten Lichteinfall optimiert wurde, eine relativ hohe winkelabhängige Lichtabsorption aufweist. Für besonders flache Einfallswinkel im Bereich von 80° konnte mit der Optimierung des Schichtstapels eine weitere Steigerung der effektiven J_{SC} von 4% erreicht werden. Jedoch für senkrechten Lichteinfall sowie über einen großen Winkelbereich hinweg zeigt die ursprüngliche Architektur bereits eine hohe Lichtabsorption, welche nahe an dem Maximum liegt.

Auf Basis der Ergebnisse kann geschlussfolgert werden, dass sich das Konzept des Resonator-Aufbaus zur Steigerung der Lichtabsorption unter realistischen Bedingungen eignet. Die Analyse hat gezeigt, dass der EY auch für diverse Orientierungen eines Moduls gesteigert werden kann. In der organischen Photovoltaik ist der Resonator-Aufbau demnach auch für Solarzellen geeignet, die aufgrund der Neigung des Untergrunds nicht optimal ausgerichtet sind.

In zukünftigen Analysen könnte der Resonator-Aufbau mithilfe des EY Modells optimiert werden, um an andere Anforderungen angepasst zu werden wie beispielsweise auf andere organische Absorber. Das Konzept könnte zudem auf Tandem-Solarzellen angewendet werden und dabei mit dem EY Modell untersucht werden. Es gibt bereits eine numerische Studie über die Integration von zwei dünnen Metallelektroden in Tandem-Solarzellen mit 3T-Verschaltung für senkrechten Lichteinfall [125]. Auch die Anwendung auf die derzeit leistungsfähigsten Tandem-Solarzellen [41] wäre interessant. In semi-transparenten Solarzellen werden bereits transparente Rückelektroden eingesetzt [126, 127]. Die Modellierung der Integration einer dünnen Metallelektrode an der Frontseite könnte darüber Aufschluss geben, in welchem Maß die Lichtabsorption in semi-transparenten Solarzellen gesteigert werden kann.

Auch andere Konzepte des Lightmanagements zur Verbesserung der Lichtabsorption in organischen Solarzellen könnten anhand des EY Modells mit dem Konzept des Resonator-Aufbaus verglichen werden. Beispielsweise ist eine Studie mit dem EY Modell über die Steigerung der winkelabhängigen Lichtabsorption durch eindimensionale photonische Kristalle [123] denkbar, ohne das EY Modell in seiner aktuellen Form erweitern oder modifizieren zu müssen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Um die Stromerzeugung durch Photovoltaikanlagen zu erhöhen, ist neben dem Ausbau der Photovoltaik die Steigerung der Bauteileffizienz wichtig. Um die Energieausbeute von Solarzellen zu maximieren, ist es von großer Bedeutung, die Auswirkungen der Einstrahlung an einem realen Standort auf das Design der Bauteile zu berücksichtigen. Hierzu wurde ein Simulationsmodell entwickelt, das den EY von Solarzellen unter realistischen Bedingungen berechnet. Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Solarzellen untersucht, um Erkenntnisse über die Auswirkung von realistischer Einstrahlung auf deren Design zu erlangen und Konzepte des Lichtmanagements in Solarzellen zu untersuchen. Dabei wurde festgestellt, dass Bauteile, die unter STC höchste Wirkungsgrade erzielen, nicht zwangsläufig geeignet unter realistischen Bedingungen sind.

Zum einen wurden Perowskit/Si 2T Solarmodule mit verschiedenen Architekturen untersucht, die zur Steigerung der Bauteileffizienz in Frage kommen. Der Wirkungsgrad von Perowskit/Si 2T Solarzellen übertrifft bereits die Si-Solarzelle, die seit jeher den Photovoltaik-Markt dominiert. Weiter wurde der EY von bifazialen Solarmodulen auf Basis von Si-Solarzellen sowie Perowskit/Si 2T Solarmodule berechnet und denkbare Architekturen optimiert. Zum anderen wurde der EY von organischen Solarzellen untersucht, um das Konzept eines Resonator-Aufbaus zur Steigerung der Leistung zu prüfen. Für diese Zwecke wurde in Zusammenarbeit mit Dr. Ulrich W. Paetzold, Dr. Malte Langenhorst und Dr. Raphael Schmagar das in dieser Arbeit verwendete Simulationsmodell entwickelt.

Im ersten Ergebnisteil wurden Perowskit/Si 2T Solarmodule simuliert, um die Auswirkungen von pyramidalen Si-Texturen auf die Lichteinkopplung und das Light-Trapping der Bauteile zu untersuchen. Dabei wurden die Architektur (ii) mit Textur an der Vorder- und Rückseite des c-Si und die Architektur (iii) mit planarer Vorderseite und Textur an der Rückseite des c-Si verglichen mit einer planaren Architektur (i). Der EY wurde für verschiedene Orte in den USA berechnet. Diese Orte decken verschiedene Klimazonen ab. Dabei weist die Architektur (ii) mit beidseitig texturiertem c-Si aufgrund hoher Lichteinkopplung und Light-Trapping die höchste Steigerung des EY auf. Gegenüber eines Si-Solarmoduls erreicht die Architektur eine relative Steigerung im EY von 26-28%. Auch die Architektur (iii) mit texturierter Rückseite erreicht eine hohe relative Steigerung von 19-22%. Die Architektur (i) mit planarem Schichtstapel erreicht 12-14%. Die Optimierung des Perowskit-Absorbers führte zu einer optimalen Bandlücke von 1.72 eV unabhängig vom Ort. Eine starke Abhängigkeit der optimalen Bandlücke von dem Spektrum der Einstrahlung am Ort wurde nicht gefunden. Die ermittelte optimale Bandlücke liegt im Bereich der optimalen Bandlücke für einen Absorber in einem Tandem in Kombination mit Si [31]. Die Optimierung des Designs der Perowskit/Si 2T Solarmodule in einer 2T-Verschaltung ist von großer Bedeutung für hohen EY. Denn die optimale Schichtdicke des Perowskits unter realistischen Bedingungen weicht deutlich von der optimalen Schichtdicke unter STC ab.

Der zweite Teil der Ergebnisse umfasst die Simulation und Optimierung von bifazialen Perowskit/Si Tandem-Solarmodulen unter dem Einfluss von Albedo-Strahlung. Hierbei wurde der EY für verschiedene Architekturen mit 2T- und 4T-Verschaltung berechnet. Da die an der Rückseite eingekoppelte Strahlung ausschließlich im c-Si absorbiert wird, muss bei einer 2T-Verschaltung der Perowskit angepasst werden, um die Verluste durch Currentmismatch zu minimieren. Das Design der Bauteile mit 2T-Verschaltung wurde für verschiedene Untergründe mit einer Albedo im Bereich von 0-100% optimiert. Ein wichtiges Resultat der Studie ist die starke Abhängigkeit der optimalen Bandlücke des Perowskits von der Albedo des Bodens. Für Sandstein mit einer Albedo von $\overline{R_A} = 9\%$ liegt die optimale Bandlücke bei 1.72 eV und für Schnee mit einer Albedo von $\overline{R_A} = 88\%$ bei 1.55 eV. Die Architektur mit Textur an der Vorder- und Rückseite von c-Si erreicht auch bei bifazialen Solarmodulen den höchsten EY. Im Vergleich zu einem bifazialen Si-Solarmodul erreicht diese Architektur für Gras mit einer Albedo von $\overline{R_A} = 35\%$ eine relative Steigerung von 24-38% und im Vergleich zu einem monofazialen Perowskit/Si 2T Solarmodul 18-23%. Bifaziale Perowskit/Si 4T Solarmodule erreichen für Untergründe mit einer Albedo bis 35% einen ähnlichen EY wie die 2T Solarmodule. Für Böden mit einer Albedo größer 35% erreicht die 4T-Verschaltung einen höheren EY, da die steigende J_{SC} im c-Si mit zunehmender Albedo aufgrund der unabhängigen Subzellen nicht wie bei der 2T-Verschaltung durch die J_{SC} im Perowskit limitiert ist. Zudem wurden die Verluste im EY für bifaziale Solarmodule durch Abschattung des Bodens berechnet. Für eine Modulreihe mit einer Aufstellhöhe von 1 m und wurden nur geringe Verluste unter 5% im EY festgestellt. Zusammenfassend konnte anhand der Simulation des EY die optimale Bandlücke des Perowskits für die Einstrahlung unter realistischen Bedingungen bestimmt werden. Daraus konnten wichtige Schlüsse für die ideale Zusammensetzung des Perowskits für die Anwendung in bifazialen Perowskit/Si Tandem-Solarzellen gezogen werden.

Der letzte Ergebnisteil behandelt die Simulation von organischen Solarzellen mit einem Resonator-Aufbau, um die Verstärkung der Lichtabsorption durch den Resonator unter schrägem Lichteinfall zu untersuchen. Zudem wurde der EY dieser Architektur berechnet, um die Steigerung des EY unter realistischen Bedingungen gegenüber einer konventionellen Architektur zu vergleichen. Bei dem Resonator-Aufbau handelt es sich um einen speziellen Schichtstapel von Liu *et al.* [20], in dem die gewöhnliche ITO-Elektrode im Wesentlichen durch eine dünne Metallelektrode in Kombination mit einem Dielektrikum ersetzt wurde. Mit diesem Resonator-Aufbau können im Absorber zwei fundamental verschiedene Frequenzen im optischen Bereich verstärkt werden. Es konnte gezeigt werden, dass das Light-Trapping in organischen Solarzellen mit Resonator auch unter schrägem Lichteinfall verbessert wird. Die Simulation der effektiven J_{SC} unter Einstrahlung mit dem AM1.5g Spektrum für beliebige Einfallswinkel zeigt die Überlegenheit Architektur mit Resonator gegenüber der konventionellen Architektur über den gesamten Winkelbereich hinweg. Anhand der Berechnung des EY wurde für die Architektur mit Resonator eine relative Steigerung von 10-13% festgestellt. Die relative Steigerung des EY fällt damit etwas geringer als die relative Steigerung des Wirkungsgrads von 17% unter STC aus, da die diffuse und direkte Strahlung unter realistischen Bedingungen über einen großen Winkelbereich verteilt sind. Die Robustheit der Architektur mit Resonator wurde anhand des EY als Funktion des Neigungs- und des Drehwinkels der Solarzelle demonstriert. Die Architektur erreicht über einen großen Winkelbereich hinweg einen hohen EY von 95% des maximalen EY bei optimaler Ausrichtung der Solarzelle. Schließlich konnte anhand der Optimierung der Architektur mit Resonator für schrägen Lichteinfall gezeigt

werden, dass die ursprüngliche Architektur, welche für senkrechten Lichteinfall ausgelegt wurde, bereits ein hohes Light-Trapping unter schrägem Lichteinfall aufweist.

7.2 Ausblick

Aus den Ergebnissen in dieser Arbeit konnten wichtige Schlüsse für das Design von effizienten Perowskit/Si Tandem-Solarzellen sowie für organische Solarzellen mit Resonator-Aufbau gezogen werden. Mit dem EY Modell wurden bisher eine Reihe von Bauteilarchitekturen untersucht. Die erfolgreiche Simulation des EY stellt weitere aufschlussreiche Untersuchungen von Solarzellen sowie von Konzepten zur Verbesserung des Lichtmanagements in Aussicht.

Aus der Entwicklung der Perowskit/Si Tandem-Solarzellen gehen weitere Architekturen hervor, für die eine Analyse des EY interessant sein könnte. Beispielsweise bietet die Idee der Kombination von Tintenstrahl-gedruckten Perowskit-Solarzellen [6] mit leistungsfähigen Si-Solarzellen eine kostengünstige Möglichkeit für die Realisierung von Perowskit/Si Solarmodulen. Mit einer Dicke des Perowskits von 1.5 μm ist die einfache Applikation von Perowskit-Solarzellen auf texturierte Si-Solarzellen denkbar. Durch Konzepte des Lichtmanagements wie die Integration texturierter Folien [57] könnte weiter die Lichteinkopplung an der planaren Vorderseite dieser Solarzellen verbessert werden. Auch die Modellierung von opaken Perowskit/Si Tandem-Solarzellen mit 4T-Verschaltung [102] könnte ausgebaut werden, indem der EY für weitere denkbare Architekturen auf Basis der 4T-Verschaltung analysiert wird. Die Vorteile von Perowskit/Si Solarzellen mit einer 3T-Verschaltung gegenüber der 2T- und 4T-Verschaltung könnten detailliert untersucht werden. Zudem könnten neue Architekturen der Perowskit/Si Tandem-Solarzellen wie die Architektur mit beidseitig texturiertem c-Si und flacher Oberseite der Perowskit-Solarzelle [100] für den Einsatz in bifazialen Solarmodulen evaluiert werden.

Die Funktionalität des EY Modells schließt auch die Untersuchung von Solarzellen mit beliebiger Orientierung ein. Das Modell könnte somit auf den Bereich der BIPV angewendet werden und es könnte beispielsweise der EY von Dünnschicht-Solarzellen auf Basis von a-Si [128] unter dem Einfluss von Albedo-Strahlung berechnet werden. Die Simulation mit beliebiger Orientierung der Solarzelle ermöglicht weiter die Berechnung des EY bei ein- oder zweiachsiger Nachführung der Solarzelle. Erste Ergebnisse über die Steigerung des EY für Solarzellen mit Nachführung wurden bereits publiziert [62].

Mit der organischen Photovoltaik kann der Anwendungsbereich von Solarzellen erweitert werden. Aufgrund ihrer Flexibilität können organische Solarzellen auch auf gekrümmten Oberflächen eingesetzt werden. Wie in der vorliegenden Arbeit gezeigt wurde, kann mit dem Konzept des Resonator-Aufbaus das Light-Trapping auch unter schrägem Lichteinfall erhöht werden. Somit kann das Konzept problemlos in Solarzellen auf unebenen Oberflächen angewendet werden. Mit dem EY Modell könnte zudem untersucht werden, welches Potential in der Integration des Resonator-Aufbaus in die leistungsfähigeren organischen Tandem-Solarzellen [41] steckt. Auch andere Konzepte des Lichtmanagements zur Erhöhung des Light-Trapings in organischen Solarzellen könnten durch die Berechnung des EY umfassender analysiert werden.

Ein interessantes Konzept des Lichtmanagements zur Optimierung von Si-Solarzellen wurde bereits mit dem EY Modell untersucht. Bei diesem Konzept wird die parasitäre Lichtabsorption in den Kontaktfingern von Si-Solarzellen durch sogenannte Cloaking-Strukturen verringert, indem das Licht durch Strukturen zur Lichtbeugung, die beispielsweise an die Oberfläche der Verkap-

selung angebracht werden, an den Kontaktfingern vorbeigeleitet wird. Damit kann eine relative Steigerung des EY von bis zu 10% erreicht werden [129].

Das EY Modell ist modular aufgebaut und kann systematisch erweitert werden. Durch den Ausbau der Funktionalität könnten diverse Konzepte wie z.B. Nanostrukturierungen von Oberflächen oder Streuschichten aus Nanopartikeln untersucht werden. Auch der Ausbau des Albedo-Modells zur detaillierteren Analyse der Abschattungsverluste bei bifazialen Solarzellen ist möglich. Die Auswirkung der direkten Abschattung sowie die Abschattung des Bodens durch benachbarte Module [130] auf den EY könnte zukünftig berücksichtigt werden, um beispielsweise den idealen Abstand zwischen Modulreihen zu ermitteln. Auch die Rückreflexion von bereits eingekoppeltem Licht an Kontaktfingern oder -schienen sowie an weißen streuenden Schichten an der Rückseite der Solarmodule so wie viele weitere Effekte könnten zukünftig berücksichtigt werden, um die Präzision des EY Modells weiter auszubauen [131].

Abbildungsverzeichnis

1.1	Nettostromerzeugung in Deutschland und Anteile der Energieträger im Jahr 2019 [2].	2
2.1	Lage der Bänder und der Fermi-Energie E_F in anorganischen Metallen, Halbleitern und Isolatoren. Bei Halbleitern und Isolatoren liegt E_F im Bereich der Bandlücke E_G . E_G reicht von der Valenzbandkante E_V bis zur Leitungsbandkante E_L	6
2.2	Gitterstruktur der Perowskite mit der Form ABX_3 . Der Gitterplatz A ist in der Regel mit Cs oder den organischen Molekülen Methylammonium (MA) oder Formamidinium (FA) besetzt, B mit Pb und X mit den Halogeniden I, Br oder Cl.	7
2.3	Schematische Darstellung einer indirekten Bandlücke und einer direkten Bandlücke. Bei der Absorption eines Photons ist im Fall der indirekten Bandlücke für die Anregung eines Elektrons aus dem Valenzband in das Leitungsband ein zusätzlicher Impulsübertrag durch z.B. ein Phonon nötig. Die Energie des Photons E_{Ph} muss mindestens gleich oder größer E_G sein.	8
2.4	Chemische Strukturformeln a) des organischen Donator-Moleküls PTB7-Th und b) des organischen Akzeptor-Moleküls PC ₇₁ BM.	10
2.5	Schematische Darstellung eines p-n-Übergangs. Bei Kontakt eines p-dotierten und eines n-dotierten Halbleiters diffundieren Elektronen der Dotier-Atome vom n-dotierten in den p-dotierten Bereich. Das resultierende elektrische Potential führt zu einem Gefälle im Leitungs- und Valenzband im Bereich des Übergangs. Im thermodynamischen Gleichgewicht ist das Niveau von E_F konstant und es stellt sich die Diffusionsspannung U_D an der Raumladungszone ein.	11
2.6	a) Vereinfachte Darstellung des Absorbers und der Elektroden in einer organischen Solarzelle. Der Absorber besteht aus dem Mischsystem von Donator und Akzeptor. b) Energetische Lage der HOMO- und LUMO-Niveaus in einem Donator und einem Akzeptor. Der Übergang des Elektrons aus einem Exziton im Donator auf den Akzeptor bei der Ladungsträgertrennung ist angedeutet.	12
2.7	Schematische Darstellung einer $J-U$ -Kennlinie im Bereich von 0 V bis U_{OC} . Die elektrische Leistungsdichte P_{el} ist das Produkt aus U_{MPP} und J_{MPP} . Am MPP ist das Produkt aus Spannung und Stromdichte maximal. Die generierte P_{el} entspricht der grün schraffierten Fläche.	13
2.8	Typischer Aufbau einer Perowskit-Solarzelle. Die Dicke der Schichten in einer Perowskit-Solarzelle liegt im Bereich von 10 nm bis 100 nm. Das Glassubstrat ist ca. 3 mm dick.	14

2.9	Schematischer Aufbau einer a) HIT-Solarzelle (engl. heterojunction with intrinsic thin layer) und einer b) IBC-Solarzelle (engl. interdigitated back contact). Die typische Schichtdicke für c-Si liegt im Bereich von 100 μm und für die Schichten aus a-Si im Bereich von 10 nm. Bei der HIT-Solarzelle sind zusätzlich Elektroden in Form von Kontaktfingern auf der Vorder- und Rückseite aufgebracht. Das TCO an der Vorderseite übernimmt hier zusätzlich die Funktion eines ARC.	15
2.10	Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme von texturiertem c-Si. Die Pyramiden haben eine Größe von wenigen Mikrometern und sind zufällig auf der Oberfläche verteilt. Entnommen aus [52]. Reprinted with permission from Sol. Energy Mater. Sol. Cells 2001, 70, 103-113. Copyright Elsevier.	15
2.11	Darstellung des Schichtaufbaus einer organischen Solarzelle. Bis auf das Glassubstrat liegen alle Schichtdicken im Bereich von 5 nm bis 100 nm. Die Dicke des Glassubstrats liegt im Bereich von 1 mm.	17
2.12	a) Prinzip einer Tandem-Solarzelle bestehend aus einem Absorber 1 mit großer Bandlücke und einem Absorber 2 mit kleiner Bandlücke. b) Beispiel für die spektrale Lichtabsorption in einer Tandem-Solarzelle unter einem AM1.5g Spektrum. In Absorber 1 wird der energiereiche Spektralbereich bis zur E_G des Absorbers 1 (beispielsweise Blau und Grün) absorbiert und in Absorber 2 der Spektralbereich bis zur E_G des Absorbers 2 (beispielsweise Rot und Infrarot). Der energieärmere Teil des Spektrums kann nicht absorbiert werden.	18
2.13	Schematischer Aufbau eines Perowskit/Si Tandem-Solarmoduls mit monolithischer 2T-Verschaltung. Der Aufbau beider Solarzellen ist invertiert (p-i-n) und die Perowskit-Solarzelle wird auf die Oberseite der Si-Solarzelle aufgebracht. Oberhalb der Modul-Schichten ist ein ARC angebracht zur Reduzierung von Reflexionsverlusten.	20
2.14	Absorptionsspektrum eines Perowskit/Si Tandem-Solarmoduls mit planarem Schichtstapel. Hierbei ist die Absorption im Perowskit (rot), im Si (grau) und die Summe der Absorption (schwarz gestrichelt) aufgetragen. Die Absorption in Perowskit und Si ist unvollständig aufgrund der optischen Verluste durch parasitäre Absorption und Reflexion.	20
2.15	Schematische Darstellung der J - U -Kennlinien einer Tandem-Solarzelle. a) Bei der 2T-Verschaltung begrenzt die Subzelle mit dem geringeren Strom den Gesamtstrom in der Tandem-Solarzelle. Die Spannung der Tandem-Solarzelle ergibt sich aus der Summe der Spannungen beider Subzellen. b) Im allgemeinen Fall der 4T-Verschaltung werden die Subzellen unabhängig voneinander betrieben.	22
2.16	AM1.5g Spektrum der terrestrischen Sonneneinstrahlung [59]. Das Spektrum gilt als Standard für die Messung des Wirkungsgrads unter STC.	23
2.17	Schematische Darstellung des Aufbaus eines bifazialen Si-Solarmoduls auf Basis einer HIT-Solarzelle mit transparentem Rückkontakt. Der verwendete Aufbau der HIT-Solarzelle ist invertiert (p-i-n).	25

3.1	Flussdiagramm für die Simulation des EY. Die Eingangsgrößen für das Modul zur Strahlungsdichte sind meteorologische Daten sowie für das Modul Optik nk-Daten der Materialien und deren Schichtdicken. Das Modul Energieertrag greift für die Berechnung des EY auf das Modul Elektrik zurück, welches die Kenngrößen der Solarzelle berechnet.	28
3.2	Spektren der mittleren spektralen Einstrahlung von direktem und diffusem Licht am Ort Daggett (Kalifornien) im Monat Juni. Die direkte Einstrahlung ist ausgeprägt, da der Ort in der Wüste mit aridem Klima liegt.	29
3.3	Reflexionsspektrum von Gras, basierend auf den Daten der Bibliothek ECOSTRESS, zur Berechnung der Albedo-Strahlung. Der entsprechende mittlere Albedowert für Gras ist 35%. Der sprunghafte Anstieg der Reflexion bei der Wellenlänge 700 nm ist eine Besonderheit des Untergrunds Gras.	30
3.4	Schematische Darstellung eines Dünnschichtstapels zur Berechnung des elektrischen Felds E entlang des Schichtstapels mit der Transfer-Matrix-Methode. An den Grenzflächen zwischen zwei Schichten sind die zur Grenzfläche parallelen Komponenten des elektrischen Felds jeweils für die vorwärts laufende ebene Welle E_{lv} und für die rückwärts laufende Welle E_{lr} eingetragen. Dabei stehen die Indizes "li" für linker Rand und "re" für rechter Rand einer Schicht. Der komplexe Brechungsindex der i -ten Schicht ist mit n_i und die Schichtdicke mit d_i gekennzeichnet.	31
3.5	Schematische Darstellung der Vielfach-Reflexion eines Lichtstrahls am Beispiel einer transparenten Schicht. Die Reflexionskoeffizienten resultieren aus der Reflexion der Teilstrahlen an den Übergängen zu den angrenzenden Schichten. Die gesamte Reflexion und Transmission der mittleren Schicht kann durch Reihenentwicklung des Produkts $r_1 \cdot r_2$ berechnet werden.	32
3.6	Schematische Darstellung der Reflexion eines Lichtstrahls an einer pyramidenförmigen Textur, wie sie bei c-Si zur Erhöhung der Lichteinkopplung eingesetzt wird. Durch mehrfache Reflexion wird die Transmission des Lichtstrahls an der Oberfläche erhöht. Dies ist beispielhaft anhand eines möglichen Pfades veranschaulicht.	34
3.7	Ersatzschaltbild des Eindiodenmodells einer Solarzelle. Von der Stromquelle geht der Photostrom I_{ph} aus. Auf den resultierenden Strom I der Solarzelle wird das charakteristische Verhalten einer Diode aufgeprägt. Elektrische Verluste werden durch den seriellen Widerstand R_S sowie den parallelen Widerstand R_P beschrieben.	36
3.8	Lichteinstrahlung auf ein beliebig gekipptes Solarmodul. Die direkte Strahlung trifft aus Richtung der Sonne ($\theta_{S,0}, \varphi_{S,0}$) auf das Solarmodul auf. Die Koordinaten der Sonnenposition werden für die weitere Berechnung in das Koordinatensystem des gekippten Moduls transformiert. Die diffuse Strahlung trifft aus dem gesamten Bereich des Himmels (grauer Bereich) und die Albedo-Strahlung aus dem gesamten Bereich des Bodens (grüner Bereich) auf das Solarmodul auf.	40
3.9	Skizzierte Seitenansicht eines bifazialen Solarmoduls in der Höhe H über dem Boden und des Schattens L_S bei direkter Sonneneinstrahlung. Auf Basis der Skizze kann der Sichtfaktor SF und die zugehörigen Längen L_1 , L_3^a und L_3^b mithilfe der Sichtwinkel ζ_a und ζ_b sowie des Neigungswinkels β des Solarmoduls und des Höhenwinkels $\theta_{S,0}$ der Sonne vereinfachend berechnet werden.	43

3.10	Schematische Darstellung eines bifazialen Solarmoduls mit Neigungswinkel β über dem Boden zur Berechnung des Sichtfaktors SF_{Himmel} an einem beliebigen Punkt am Boden. Es wird weiter das zugehörige Koordinatensystem mit Ursprung im Solarmodul definiert sowie die Koordinaten (θ, φ) des Punktes eingetragen. Die Sichtwinkel ζ_c und ζ_d geben den Winkelbereich an, unter dem bei Abschattung der diffusen Einstrahlung vom Himmel Licht auf den Boden auftrifft.	45
4.1	Darstellung der Architekturen für Perowskit/Si 2T Tandem-Solarmodule. (i) Architektur mit planarer Vorder- und Rückseite des c-Si, (ii) mit texturierter Vorder- und Rückseite des c-Si und (iii) mit planarer Vorderseite und texturierter Rückseite. Entnommen aus [91] und angepasst.	48
4.2	Darstellung der zugrunde liegenden Architektur für die Simulation von Si-Solarmodulen mit texturierter Vorder- und Rückseite des c-Si. Die Solarzelle dient als Referenz zum Vergleich mit Perowskit/Si 2T Tandem-Solarmodulen.	49
4.3	Absorptionsspektrum der Schichten Perowskit und c-Si sowie der parasitären Absorption in allen restlichen Schichten der Perowskit/Si 2T Solarmodule. Die Absorption ist für die drei Architekturen basierend auf (i) planarem c-Si, (ii) beidseitig texturiertem c-Si und (iii) c-Si mit planarer Vorderseite und texturierter Rückseite gezeigt. Zusätzlich ist die integrierte J_{SC} jedes Absorbers eingetragen. Entnommen aus [91] und angepasst.	50
4.4	Absorption einer Si-Solarzelle mit der Textur random upright an der Vorder- und Rückseite des c-Si. Die Absorption ist aufgeteilt in die Schichten ARC, ITO, a-Si(i) und c-Si. Entnommen aus [91] und angepasst.	51
4.5	Darstellung der berechneten Kennlinien a) für die planare Perowskit-Solarzelle mit der Bandlücke 1.72 eV und b) für die an der Vorder- und Rückseite texturierte Si-Solarzelle als Referenzbauteil. Hierbei werden die Solarzellen unter STC beleuchtet und die entsprechende J_{SC} geht in die Berechnung der Kennlinie ein. Entnommen aus [91].	52
4.6	Verhalten der J_{SC} eines Perowskit/Si 2T Solarmoduls mit beidseitig texturiertem c-Si in Abhängigkeit der Perowskit-Schichtdicke zur Veranschaulichung des Currentmatchings. Currentmatching wird bei der Schichtdicke erreicht, bei der die J_{SC} von Perowskit- und Si-Subzelle gleich sind. Zum Vergleich mit dem Referenzbauteil ist die Hälfte der J_{SC} des Si-Solarmoduls aufgeführt. Entnommen aus [91].	54
4.7	Darstellung von η in Abhängigkeit der Perowskit-Schichtdicke für die drei Architekturen sowie für das Si-Solarmodul als Referenz. Die relative Steigerung von η im Vergleich zum Referenzbauteil ist jeweils bei der optimalen Schichtdicke eingetragen. Entnommen aus [91].	54
4.8	EY als Funktion der Perowskit-Schichtdicke für die drei untersuchten Architekturen der Perowskit/Si 2T Solarmodule sowie für das Si-Solarmodul als Referenz. Der EY wurde für den Ort Daggett (Kalifornien) berechnet. Die maximale relative Steigerung des EY ist für jede Architektur an der optimalen Schichtdicke eingetragen.	56

4.9	Maximaler EY der drei untersuchten Perowskit/Si 2T Solarmodule sowie des Si-Solarmoduls an den fünf verschiedenen Orte Daggett, Miami, Nashville, Portland und Salt Lake City. Bei den gezeigten Ergebnissen wurden die Perowskit-Schichtdicke sowie der Neigungswinkel des Moduls optimiert. Für jede Architektur ist die relative Steigerung im EY verglichen mit dem Si-Solarmodul eingetragen. Entnommen aus [91].	58
4.10	Darstellung des EY für die drei Architekturen der Perowskit/Si 2T Solarmodule in Abhängigkeit des Neigungswinkels sowie der Schichtdicke des Perowskits. Der EY ist am Ort Daggett und bei einer Modulneigung von 0-90° in Südausrichtung gezeigt. Entnommen aus [91].	59
4.11	Winkelabhängiger EY für die Architektur (i) Planar mit Neigung des Moduls in Südausrichtung. Neben dem gesamten EY ist der imaginäre EY für die Fälle nur direkte bzw. nur diffuse Einstrahlung dargestellt.	59
4.12	Berechneter EY für die Architektur (i) mit planarem c-Si in Abhängigkeit der Schichtdicke für verschiedene Bandlücken des Perowskits. Zusätzlich ist der EY eines Si-Solarmoduls basierend auf planarem c-Si aufgeführt. Für jede Bandlücke ist die optimale Schichtdicke des Perowskits gekennzeichnet. Entnommen aus [91].	61
4.13	EY für die Architektur (ii) mit beidseitig texturiertem c-Si als Funktion der Schichtdicke. Als Referenz ist der EY des Si-Solarmoduls mit derselben Textur eingetragen. Die jeweilige optimale Schichtdicke ist für jede Bandlücke hervorgehoben. Entnommen aus [91].	61
4.14	Darstellung des EY für die Orte Daggett, Miami, Nashville, Portland und Salt Lake City. Der EY ist für die Architektur (ii) mit beidseitig texturiertem c-Si und einer Perowskit-Bandlücke von 1.72 eV gezeigt. Die optimale Schichtdicke des Perowskits ist für jeden Ort gekennzeichnet. Entnommen aus [91].	62
4.15	Maximaler EY für die drei untersuchten Architekturen am Ort Daggett. Gezeigt wird jeweils der EY mit optimierter Schichtdicke des Perowskits und optimiertem Neigungswinkel des Moduls. Entnommen aus [91].	63
4.16	Vergleich des maximalen EY für Orte in verschiedenen klimatischen Zonen mit optimierter Perowskit-Schichtdicke und optimierten Neigungswinkel des Moduls. Entnommen aus [91].	63
5.1	Schematische Darstellung des bifazialen Si-Solarmoduls mit Textur an der Vorder- und Rückseite des c-Si. Das Bauteil wird als Referenz zum Vergleich mit bifazialen Perowskit/Si Tandem-Solarmodulen verwendet.	70
5.2	a) Spektrale Absorption im Schichtstapel der Si-Solarzelle mit beidseitiger Textur des c-Si unter senkrechten Lichteinfall. b) Zugehörige $J-U$ -Kennlinie sowie elektrische Kenngrößen der Si-Solarzelle unter STC. Entnommen aus [108] und angepasst.	71
5.3	Architekturen der bifazialen Perowskit/Si 2T Solarmodule. (i) Architektur mit vollständig planarem Schichtstapel, (ii) mit flacher Vorderseite und texturierter Rückseite des c-Si, (iii) mit flacher Vorderseite und texturierter Rückseite des c-Si und texturiertem Frontglas und (iv) mit beidseitig texturiertem c-Si. Entnommen aus [108] und angepasst.	72

5.4	Architektur des bifazialen Perowskit/Si 4T Solarmoduls basierend auf einer beidseitig texturierten Si-Solarzelle und einer planaren Perowskit-Solarzelle. Die Solarzellen sind durch eine Verkapselungsschicht verbunden.	73
5.5	Absorptionsspektren der Architekturen bifaziales Si-Solarmodul, bifaziales Perowskit/Si 2T Solarmodul und bifaziales Perowskit/Si 4T Solarmodul. Die Absorption ist jeweils für senkrechten Lichteinfall an der Vorderseite des Solarmoduls (oben) und an der Rückseite des Solarmoduls (unten) gezeigt. Zu sehen ist die Absorption im Perowskit, im c-Si sowie die parasitäre Absorption in allen übrigen Schichten der jeweiligen Schichtstapel. Entnommen aus [108] und angepasst.	75
5.6	Darstellung der Absorption in den Architekturen monofaziales Perowskit/Si 2T Solarmodul und monofaziales Perowskit/Si 4T Solarmodul. Die Schichtstapel werden dabei an der Vorderseite unter senkrechtem Lichteinfall beleuchtet. Entnommen aus [108] und angepasst.	75
5.7	Darstellung der J - U -Kennlinien verschiedener Architekturen unter Beleuchtung mit AM1.5g Spektrum an der Vorderseite sowie 30% der Intensität an der Rückseite. Aufgeführt sind jeweils die monofazialen und bifazialen Architekturen eines Si-Solarmoduls, Perowskit/Si 2T Solarmoduls und Perowskit/Si 4T Solarmoduls. Entnommen aus [108] und angepasst.	76
5.8	Darstellung der Reflexionsspektren der fünf Böden Sandstein, Beton, Gras, heller Sandstein und Schnee sowie der zwei künstlichen Untergründe perfekter Absorber und perfekter Reflektor. Die Spektren werden für die Berechnung der Albedo-Strahlung verwendet. Für jeden Boden ist die zugehörige \overline{R}_A in der Legende angegeben. Entnommen aus [108] und angepasst.	77
5.9	EY eines monofazialen Perowskit/Si 2T Solarmoduls und die mittlere J_{SC} in beiden Subzellen als Funktion der Perowskit-Schichtdicke. Für die Berechnung wurde die Lichteinstrahlung am Ort Daggett verwendet sowie der Neigungswinkel des Moduls optimiert. Entnommen aus [108].	78
5.10	Darstellung des EY eines bifazialen Perowskit/Si 2T Solarmoduls sowie der mittleren J_{SC} in beiden Subzellen am Ort Daggett. Im oberen Schaubild wurde mit der Albedo-Strahlung des Bodens Sandstein gerechnet und im unteren Schaubild mit der Albedo-Strahlung des Untergrunds Beton. Der Neigungswinkel des Moduls ist optimiert. Entnommen aus [108].	79
5.11	Maximaler EY der bifazialen Perowskit/Si 2T Solarmodule am Ort Daggett für verschiedene Perowskit-Bandlücken im Bereich von 1.55 bis 1.88 eV sowie für die Böden mit \overline{R}_A von 0 bis 100%. Zum Vergleich sind die Referenzbauteile monofaziales und bifaziales Si-Solarmodul sowie monofaziales Perowskit/Si 2T Solarmodul aufgeführt. Für jeden Boden ist die maximale relative Steigerung des EY im Vergleich zum monofazialen Si-Solarmodul an der optimalen Bandlücke eingetragen. Entnommen aus [108] und angepasst.	80
5.12	Darstellung des maximalen EY von bifazialen Perowskit/Si 2T Solarmodulen für verschiedene Perowskit-Bandlücken und Böden am Ort Portland. Die Details sind wie in Abbildung 5.11. Entnommen aus [108] und angepasst.	81

5.13	Maximaler EY für die Architekturen (i) Planar, (ii) mit rückseitig texturiertem c-Si und Architektur (iii) mit rückseitig texturiertem c-Si und texturiertem Frontglas. Der EY wurde für verschiedene Perowskit-Bandlücken und für verschiedene Böden am Ort Daggett berechnet. Wie in Abbildung 5.11 ist zum Vergleich der EY der Referenzbauteile monofaziales und bifaziales Si-Solarmodul sowie monofaziales Perowskit/Si 2T Solarmodul aufgeführt. Die maximale relative Steigerung des EY im Vergleich zum monofazialen Si-Solarmodul ist für jeden Boden an der optimalen Bandlücke eingetragen. Entnommen aus [108] und angepasst.	83
5.14	Darstellung des maximalen EY als Funktion der Albedo an den Orten Daggett und Portland für bifaziale Perowskit/Si 2T und 4T Solarmodule sowie für die Referenzbauteile. Dabei sind sowohl die Bandlücke und Schichtdicke des Perowskits optimiert, als auch der Neigungswinkel des Moduls. Für die Tandem-Solarmodule ist die jeweilige optimale Bandlücke angegeben. Entnommen aus [108] und angepasst.	84
5.15	Links: Skizze einer Modulreihe über dem Boden und deren Schatten. Rechts: EY als Funktion der Aufstellhöhe zur Veranschaulichung der Verluste durch die Abschattung des Bodens am Ort Daggett und mit dem Untergrund heller Sandstein. Entnommen aus [108] und angepasst.	86
5.16	Darstellung der generierten elektrischen Leistungsdichte bezogen auf die Summe von direkter und diffuser Strahlung sowie auf die Albedo-Strahlung für verschiedene Aufstellhöhen des Moduls. Gezeigt wird der zeitliche Verlauf der Leistungsdichte über einen Tag (29. Juni) hinweg am Ort Daggett mit hellem Sandstein. Entnommen aus [108].	87
6.1	a) Architektur der organischen Solarzelle mit Resonator und b) konventionelle Architektur einer organischen Solarzelle ohne Resonator-Aufbau.	93
6.2	Darstellung der Intensität des elektrischen Felds in der Konfiguration (1) ohne dünne Metallelektrode für die Architektur mit Resonator. Der Verlauf ist für die Wellenlängen 440 nm und 655 nm gezeigt. Anstelle des Absorbers wurde eine idealisierte Schicht ($n = 2$, $k = 0$) verwendet, um die Verstärkung der Intensität zu verdeutlichen.	94
6.3	Darstellung der Intensität des elektrischen Felds in der Konfiguration (2) mit dünner Metallelektrode ($d_{Ag} = 15$ nm) für die Architektur mit Resonator. Der Absorber wurde durch eine idealisierte Schicht ($n = 2$, $k = 0$) ersetzt, um die Verstärkung der Intensität zu verdeutlichen.	94
6.4	Spektrale Absorption für alle Schichten im Schichtstapel der konventionellen Architektur sowie der Architektur mit optischem Resonator-Aufbau. Entnommen aus [124] und angepasst.	96
6.5	Direkter Vergleich der spektralen Absorption in PTB7-Th:PC ₇₁ BM für beide Architekturen. Entnommen aus [124].	96
6.6	Darstellung der berechneten J-U-Kennlinien unter STC für beide Solarzellen mit und ohne Resonator. Entnommen aus [124].	97
6.7	Darstellung der J_{SC} als Funktion der Schichtdicke von PTB7-Th:PC ₇₁ BM für beide Architekturen unter senkrechtem Lichteinfall.	98

6.8	Berechneter Wirkungsgrad der Architektur mit Resonator und der konventionellen Architektur als Funktion der Schichtdicke von PTB7-Th:PC ₇₁ BM unter STC.	99
6.9	Darstellung der effektiven J_{SC} als Funktion des Einfallswinkels für die Architektur mit Resonator und für das Referenzbauteil. Zur Berechnung der effektiven J_{SC} wird für jeden Einfallswinkel das AM1.5g Spektrum verwendet. Entnommen aus [124].	100
6.10	Maximaler EY für die Architekturen mit und ohne Resonator für fünf Orte in verschiedenen klimatischen Zonen. Der Neigungswinkel der Solarzelle ist für jeden Ort optimiert. Entnommen aus [124] und angepasst.	101
6.11	EY der Solarzelle mit Resonator als Funktion des Neigungswinkels und der Drehung der Solarzelle. Der EY wurde für den Ort Phoenix berechnet. Entnommen aus [124].	102
6.12	Darstellung der effektiven J_{SC} als Funktion des Einfallswinkels. Hierbei wird die effektive J_{SC} der ursprünglichen Architektur verglichen mit der maximalen effektiven J_{SC} , die durch Optimierung der Architektur für jeden Einfallswinkel erreicht werden kann. Entnommen aus [124].	102

Tabellenverzeichnis

4.1	Liste der verwendeten elektrischen Parameter zur Berechnung der J - U -Kennlinie mit dem Eindiodenmodell. Die aufgeführten Parameter sind die Sperrsättigungsstromdichte J_0 , der Idealitätsfaktor n und der Serienwiderstand R_S	52
4.2	Simulierte Kenngrößen der drei Bauteile planare Perowskit-Solarzelle, beidseitig texturierte Si-Solarzelle und beidseitig texturiertes Perowskit/Si 2T Solarmodul. *Bei dem Perowskit/Si 2T Solarmodul wurde die Perowskit-Schichtdicke optimiert, um die Ströme der Subzellen anzupassen (Currenmatching).	53
5.1	Sperrsättigungsstromdichte J_0 , Idealitätsfaktor n und Serienwiderstand R_S der HIT-Solarzelle für das Eindiodenmodell zur Berechnung der J - U -Kennlinie. . . .	70
6.1	Elektrische Parameter der organischen Solarzellen zur Berechnung der J - U -Kennlinie mit dem Eindiodenmodell.	97
6.2	Berechnete Kenngrößen mit dem Eindiodenmodell für die Solarzelle ohne Resonator sowie die Solarzelle mit Resonator.	97

Literaturverzeichnis

- [1] “International Energy Agency - Electricity Information 2019,” <https://www.iea.org/reports/electricity-information-2019>, 08.04.2020.
- [2] “Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme - Energy Charts,” <https://www.energy-charts.de/>, accessed 08.04.2020.
- [3] K. Yoshikawa, H. Kawasaki, W. Yoshida, T. Irie, K. Konishi, K. Nakano, T. Uto, D. Adachi, M. Kanematsu, H. Uzu, and K. Yamamoto, “Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%,” *Nature Energy*, vol. 2, no. 5, 2017.
- [4] A. Richter, M. Hermle, and S. W. Glunz, “Reassessment of the Limiting Efficiency for Crystalline Silicon Solar Cells,” *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 3, no. 4, pp. 1184–1191, 2013.
- [5] “Best Research-Cell Efficiencies,” <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>, 27.03.2020.
- [6] H. Eggers, F. Schackmar, T. Abzieher, Q. Sun, U. Lemmer, Y. Vaynzof, B. S. Richards, G. Hernandez-Sosa, and U. W. Paetzold, “Inkjet-Printed Micrometer-Thick Perovskite Solar Cells with Large Columnar Grains,” *Advanced Energy Materials*, vol. 10, no. 6, 2020.
- [7] E. L. Unger, L. Kegelmann, K. Suchan, D. Sörell, L. Korte, and S. Albrecht, “Roadmap and roadblocks for the band gap tunability of metal halide perovskites,” *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 5, no. 23, pp. 11401–11409, 2017.
- [8] A. Cuevas, A. Luque, J. Eguren, and J. del Alamo, “50 per cent more output power from an albedo-collecting flat panel using bifacial solar cells,” *Solar Energy*, vol. 29, no. 5, pp. 419–420, 1982.
- [9] M. T. Hörantner and H. Snaith, “Predicting and Optimising the Energy Yield of Perovskite-on-Silicon Tandem Solar Cells under Real World Conditions,” *Energy Environ. Sci.*, vol. 10, no. 9, pp. 1983–1993, 2017.
- [10] M. Alonso-Abella, F. Chenlo, G. Nofuentes, and M. Torres-Ramírez, “Analysis of spectral effects on the energy yield of different PV (photovoltaic) technologies: The case of four specific sites,” *Energy*, vol. 67, pp. 435–443, 2014.
- [11] O. Dupré, B. Niesen, S. De Wolf, and C. Ballif, “Field Performance versus Standard Test Condition Efficiency of Tandem Solar Cells and the Singular Case of Perovskites/Silicon Devices,” *Journal of Physical Chemistry Letters*, vol. 9, no. 2, pp. 446–458, 2018.

- [12] R. Koeppel, D. Hoeglinger, P. A. Troshin, R. N. Lyubovskaya, V. F. Razumov, and N. S. Sariciftci, "Organic Solar Cells with Semitransparent Metal Back Contacts for Power Window Applications," *ChemSusChem*, vol. 2, no. 4, pp. 309–313, 2009.
- [13] M. Debije, "Better luminescent solar panels in prospect," *Nature*, vol. 519, pp. 298–299, 2015.
- [14] C. Sun, R. Xia, H. Shi, H. Yao, X. Liu, J. Hou, F. Huang, H.-L. Yip, and Y. Cao, "Heat-Insulating Multifunctional Semitransparent Polymer Solar Cells," *Joule*, vol. 2, no. 9, pp. 1816–1826, 2018.
- [15] V. Shrotriya, "Polymer power," *Nature Photonics*, vol. 3, no. 8, pp. 447–449, 2009.
- [16] F. C. Krebs, "Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 93, no. 4, pp. 394–412, 2009.
- [17] H.-W. Chang, J. Lee, S. Hofmann, Y. H. Kim, L. Müller-Meskamp, B. Lüssem, C.-C. Wu, K. Leo, and M. C. Gather, "Nano-particle based scattering layers for optical efficiency enhancement of organic light-emitting diodes and organic solar cells," *Journal of Applied Physics*, vol. 113, no. 20, p. 204502, 2013.
- [18] A. Mihi, F. J. Beck, T. Lasanta, A. K. Rath, and G. Konstantatos, "Imprinted Electrodes for Enhanced Light Trapping in Solution Processed Solar Cells," *Advanced Materials*, vol. 26, no. 3, pp. 443–448, 2014.
- [19] N. P. Sergeant, A. Hadipour, B. Niesen, D. Cheyns, P. Heremans, P. Peumans, and B. P. Rand, "Design of Transparent Anodes for Resonant Cavity Enhanced Light Harvesting in Organic Solar Cells," *Advanced Materials*, vol. 24, no. 6, pp. 728–732, 2012.
- [20] Q. Liu, P. Romero-Gomez, P. Mantilla-Perez, S. Colodrero, J. Toudert, and J. Martorell, "A Two-Resonance Tapping Cavity for an Optimal Light Trapping in Thin-Film Solar Cells," *Advanced Energy Materials*, vol. 7, no. 18, pp. 1–8, 2017.
- [21] W. Brütting, *Physics of Organic Semiconductors*. Weinheim: Wiley-VCH, 2005.
- [22] J. H. Werner, S. Kolodinski, U. Rau, J. K. Arch, and E. Bauser, "Silicon solar cell of 16.8 μm thickness and 14.7% efficiency," *Applied Physics Letters*, vol. 62, no. 23, pp. 2998–3000, 1993.
- [23] S. D. Stranks, G. E. Eperon, G. Grancini, C. Menelaou, M. J. P. Alcocer, T. Leijtens, L. M. Herz, A. Petrozza, and H. J. Snaith, "Electron-Hole Diffusion Lengths Exceeding 1 Micrometer in an Organometal Trihalide Perovskite Absorber," *Science*, vol. 342, no. 2013, pp. 341–344, 2014.
- [24] G. W. Adhyaksa, L. W. Veldhuizen, Y. Kuang, S. Brittman, R. E. Schropp, and E. C. Garnett, "Carrier Diffusion Lengths in Hybrid Perovskites: Processing, Composition, Aging, and Surface Passivation Effects," *Chemistry of Materials*, vol. 28, no. 15, pp. 5259–5263, 2016.

- [25] B. Ebenhoch, S. A. J. Thomson, K. Genevičius, G. Juška, and I. D. W. Samuel, "Charge carrier mobility of the organic photovoltaic materials PTB7 and PC71BM and its influence on device performance," *Organic Electronics*, vol. 22, pp. 62–68, 2015.
- [26] C. C. Stoumpos, C. D. Malliakas, and M. G. Kanatzidis, "Semiconducting Tin and Lead Iodide Perovskites with Organic Cations: Phase Transitions, High Mobilities, and Near-Infrared Photoluminescent Properties," *Inorganic Chemistry*, vol. 52, no. 15, pp. 9019–9038, 2013.
- [27] H. Oga, A. Saeki, Y. Ogomi, S. Hayase, and S. Seki, "Improved Understanding of the Electronic and Energetic Landscapes of Perovskite Solar Cells: High Local Charge Carrier Mobility, Reduced Recombination, and Extremely Shallow Traps," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 136, no. 39, pp. 13818–13825, 2014.
- [28] M. A. Green, A. Ho-Baillie, and H. J. Snaith, "The emergence of perovskite solar cells," *Nature Photonics*, vol. 8, no. 7, pp. 506–514, 2014.
- [29] P. F. Ndione, Z. Li, and K. Zhu, "Effects of alloying on the optical properties of organic-inorganic lead halide perovskite thin films," *J. Mater. Chem. C*, vol. 4, no. 33, pp. 7775–7782, 2016.
- [30] A. Sadhanala, F. Deschler, T. H. Thomas, S. E. Dutton, K. C. Goedel, F. C. Hanusch, M. L. Lai, U. Steiner, T. Bein, P. Docampo, D. Cahen, and R. H. Friend, "Preparation of single-phase films of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Pb}(\text{I}_{1-x}\text{Br}_x)_3$ with sharp optical band edges," *Journal of Physical Chemistry Letters*, vol. 5, no. 15, pp. 2501–2505, 2014.
- [31] A. De Vos, "Detailed balance limit of the efficiency of tandem solar cells," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 13, pp. 839–846, 1980.
- [32] P. Löper, B. Niesen, S.-J. Moon, S. Martin de Nicolas, J. Holovsky, Z. Remes, M. Ledinsky, F.-J. Haug, J.-H. Yum, S. De Wolf, C. Ballif, P. Loeper, B. Niesen, S.-J. Moon, S. M. de Nicolas, J. Holovsky, Z. Remes, M. Ledinsky, F.-J. Haug, J.-H. Yum, S. De Wolf, and C. Ballif, "Organic-Inorganic Halide Perovskites: Perspectives for Silicon-Based Tandem Solar Cells," *Ieee Journal of Photovoltaics*, vol. 4, no. 6, pp. 1545–1551, 2014.
- [33] L. M. Pazos-Outon, M. Szumilo, R. Lamboll, J. M. Richter, M. Crespo-quesada, M. Abdijalebi, H. J. Beeson, M. Vrućinić, M. Alsari, H. J. Snaith, B. Ehrler, R. H. Friend, and F. Deschler, "Photon recycling in lead iodide perovskite solar cells," *Science (New York, N.Y.)*, vol. 351, no. 6280, pp. 1430–1434, 2016.
- [34] S. Albrecht, M. Saliba, J. P. Correa Baena, F. Lang, L. Kegelmann, M. Mews, L. Steier, A. Abate, J. Rappich, L. Korte, R. Schlatmann, M. K. Nazeeruddin, A. Hagfeldt, M. Grätzel, and B. Rech, "Monolithic perovskite/silicon-heterojunction tandem solar cells processed at low temperature," *Energy Environ. Sci.*, vol. 9, no. 1, pp. 81–88, 2016.
- [35] N. K. Noel, S. D. Stranks, A. Abate, C. Wehrenfennig, S. Guarnera, A.-A. Haghighirad, A. Sadhanala, G. E. Eperon, S. K. Pathak, M. B. Johnston, A. Petrozza, L. M. Herz, and H. J. Snaith, "Lead-free organic-inorganic tin halide perovskites for photovoltaic applications," *Energy and Environmental Science*, vol. 7, no. 9, pp. 3061–3068, 2014.

- [36] W. Chen, Y. Zhou, G. Chen, Y. Wu, B. Tu, F.-Z. Liu, L. Huang, A. M. C. Ng, A. B. Djurišić, and Z. He, “Alkali Chlorides for the Suppression of the Interfacial Recombination in Inverted Planar Perovskite Solar Cells,” *Advanced Energy Materials*, vol. 9, p. 1803872, 2019.
- [37] S. Philipps and W. Warmuth, “Fraunhofer ISE: Photovoltaics Report, updated: 14 November 2019,” tech. rep., Fraunhofer ISE, 2019.
- [38] T. Wang, B. Daiber, J. M. Frost, S. A. Mann, E. C. Garnett, A. Walsh, and B. Ehrler, “Indirect to direct bandgap transition in methylammonium lead halide perovskite,” *Energy and Environmental Science*, vol. 10, no. 2, pp. 509–515, 2017.
- [39] R. H. Klazes, M. H. L. M. van den Broek, J. Bezemer, and S. Radelaar, “Determination of the optical bandgap of amorphous silicon,” *Philosophical Magazine B*, vol. 45, no. 4, pp. 377–383, 1982.
- [40] G. Li, R. Zhu, and Y. Yang, “Polymer solar cells,” *Nature Photonics*, vol. 6, no. 3, pp. 153–161, 2012.
- [41] L. Meng, Y. Zhang, X. Wan, C. Li, X. Zhang, Y. Wang, X. Ke, Z. Xiao, L. Ding, R. Xia, H.-L. Yip, Y. Cao, and Y. Chen, “Organic and solution-processed tandem solar cells with 17.3% efficiency,” *Science*, vol. 361, no. 6407, pp. 1094–1098, 2018.
- [42] S.-H. Liao, H.-J. Jhuo, P.-N. Yeh, Y.-S. Cheng, Y.-L. Li, Y.-H. Lee, S. Sharma, and S.-A. Chen, “Single Junction Inverted Polymer Solar Cell Reaching Power Conversion Efficiency 10.31% by Employing Dual-Doped Zinc Oxide Nano-Film as Cathode Interlayer,” *Scientific Reports*, vol. 4, pp. 1–7, 2014.
- [43] S.-H. Liao, H.-J. Jhuo, Y.-S. Cheng, and S.-A. Chen, “Fullerene Derivative-Doped Zinc Oxide Nanofilm as the Cathode of Inverted Polymer Solar Cells with Low-Bandgap Polymer (PTB7-Th) for High Performance,” *Advanced Materials*, vol. 25, no. 34, pp. 4766–4771, 2013.
- [44] S. Nam, J. Seo, S. Woo, W. H. Kim, H. Kim, D. D. Bradley, and Y. Kim, “Inverted polymer fullerene solar cells exceeding 10% efficiency with poly(2-ethyl-2-oxazoline) nanodots on electron-collecting buffer layers,” *Nature Communications*, vol. 6, pp. 1–9, 2015.
- [45] M. Jørgensen, K. Norrman, and F. C. Krebs, “Stability/degradation of polymer solar cells,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 92, no. 7, pp. 686–714, 2008.
- [46] X. Du, T. Heumueller, W. Gruber, A. Classen, T. Unruh, N. Li, and C. J. Brabec, “Efficient Polymer Solar Cells Based on Non-fullerene Acceptors with Potential Device Lifetime Approaching 10 Years,” *Joule*, vol. 3, no. 1, pp. 215–226, 2019.
- [47] “Standard IEC 60904-3, Measurement Principles for Terrestrial PV Solar Devices with Reference Spectral Irradiance Data,” *International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland*.

- [48] A. Kojima, K. Teshima, Y. Shirai, and T. Miyasaka, "Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 131, no. 17, pp. 6050–6051, 2009.
- [49] J. Burschka, N. Pellet, S.-J. Moon, R. Humphry-Baker, P. Gao, M. K. Nazeeruddin, and M. Grätzel, "Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells," *Nature*, vol. 499, pp. 316–319, 2013.
- [50] F. Mathies, T. Abzieher, A. Hochstuhl, K. Glaser, A. Colsmann, U. W. Paetzold, G. Hernandez-Sosa, U. Lemmer, and A. Quintilla, "Multipass inkjet printed planar methylammonium lead iodide perovskite solar cells," *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 4, no. 48, pp. 19207–19213, 2016.
- [51] M. Taguchi, A. Yano, S. Tohoda, K. Matsuyama, Y. Nakamura, T. Nishiwaki, K. Fujita, and E. Maruyama, "24.7% Record efficiency HIT solar cell on thin silicon wafer," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 4, no. 1, pp. 96–99, 2014.
- [52] P. K. Singh, R. Kumar, M. Lal, S. N. Singh, and B. K. Das, "Effectiveness of anisotropic etching of silicon in aqueous alkaline solutions," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 70, no. 1, pp. 103–113, 2001.
- [53] D. Redfield, "Multiple-pass thin-film silicon solar cell," *Applied Physics Letters*, vol. 25, no. 11, pp. 647–648, 1974.
- [54] "World Record: Efficiency of perovskite silicon tandem solar cell jumps to 29.15 per cent," https://www.helmholtz-berlin.de/pubbin/news_seite?nid=21020, 27.03.2020.
- [55] S. Albrecht and B. Rech, "Perovskite solar cells: On top of commercial photovoltaics," *Nature Energy*, vol. 2, no. 1, 2017.
- [56] M. Woodhouse, B. Smith, A. Ramdas, and R. Margolis, "Crystalline Silicon Photovoltaic Module Manufacturing Costs and Sustainable Pricing: 1H 2018 Benchmark and Cost Reduction Roadmap," tech. rep., National Renewable Energy Laboratory, Golden, 2019.
- [57] M. Jošt, E. Köhnen, A. B. Morales-Vilches, B. Lipovšek, K. Jäger, B. Macco, A. Al-Ashouri, J. Krč, L. Korte, B. Rech, R. Schlatmann, M. Topič, B. Stannowski, and S. Albrecht, "Textured interfaces in monolithic perovskite/silicon tandem solar cells: Advanced light management for improved efficiency and energy yield," *Energy and Environmental Science*, vol. 11, no. 12, pp. 3511–3523, 2018.
- [58] M. Jaysankar, M. Filipic, B. Zielinski, R. Schmager, W. Song, W. Qiu, U. W. Paetzold, T. Aernouts, M. Debucquoy, R. Gehlhaar, and J. Poortmans, "Perovskite-silicon tandem solar modules with optimised light harvesting," *Energy & Environmental Science*, vol. 11, pp. 1489–1498, 2018.
- [59] "Reference Solar Spectral Irradiance: Air Mass 1.5," <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-am1.5.html>, 27.03.2020.

- [60] S. Wang, O. Wilkie, J. Lam, R. Steeman, W. Zhang, K. S. Khoo, S. C. Siong, and H. Rostan, "Bifacial Photovoltaic Systems Energy Yield Modelling," *Energy Procedia*, vol. 77, pp. 428–433, 2015.
- [61] U. W. Paetzold, R. Gehlhaar, J. Tait, W. Qiu, J. Bastos, M. Debucquoy, M. Jaysankar, T. Aernouts, and J. Poortmans, "Optical Loss Analyses and Energy Yield Modelling of Perovskite/silicon Multijunction Solar Cells," in *Light, Energy and the Environment*, p. SoW2C.4, Optical Society of America, 2016.
- [62] R. Schmager, M. Langenhorst, J. Lehr, U. Lemmer, B. S. Richards, and U. W. Paetzold, "Methodology of energy yield modelling of perovskite-based multi-junction photovoltaics," *Optics Express*, vol. 27, no. 8, pp. 507–523, 2019.
- [63] S. Wilcox and W. Marion, "Users manual for TMY3 data sets," *Renewable Energy*, no. May, p. 51, 2008.
- [64] C. A. Gueymard, "Parameterized transmittance model for direct beam and circumsolar spectral irradiance," *Solar Energy*, vol. 71, no. 5, pp. 325–346, 2001.
- [65] A. Sucich, T. Snyder, R. S. Bittencourt, E. H. Cirilo, J. Madajian, Y. Wang, B. Miller, P. Srinivasan, P. M. Lubin, and G. B. Hughes, "Experimental design for remote laser evaporative molecular absorption spectroscopy sensor system concept," in *SPIE Optical Engineering + Applications*, no. 10769, 2018.
- [66] A. M. Baldridge, S. J. Hook, C. I. Grove, and G. Rivera, "The ASTER spectral library version 2.0," *Remote Sensing of Environment*, vol. 113, no. 4, pp. 711–715, 2009.
- [67] M. Langenhorst, *Cloaked contact grids for perovskite-silicon tandem solar modules*. PhD thesis, Karlsruhe Institute of Technology, 2020.
- [68] E. Yablonovitch and G. D. Cody, "Intensity Enhancement in Textured Optical Sheets for Solar Cells," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 29, no. 2, pp. 300–305, 1982.
- [69] J. B. Pendry, "Photonic band structures," *Journal of Modern Optics*, vol. 41, no. 2, pp. 209–229, 1994.
- [70] P. Campbell and M. A. Green, "Light trapping properties of pyramidally textured surfaces," *Journal of Applied Physics*, vol. 62, no. 1, pp. 243–249, 1987.
- [71] J. A. Rand and P. A. Basore, "Light-trapping silicon solar cells-experimental results and analysis," in *The Conference Record of the Twenty-Second IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 192–197, 1991.
- [72] S. C. Baker-Finch and K. R. McIntosh, "Reflection of normally incident light from silicon solar cells with pyramidal texture," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 19, pp. 406–416, 2011.
- [73] K. R. McIntosh and S. C. Baker-Finch, "OPAL 2: Rapid optical simulation of silicon solar cells," in *38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 265–271, 2012.

- [74] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, vol. 53. Hoboken: Wiley, fourth ed., 2013.
- [75] A. Jain and A. Kapoor, “Exact analytical solutions of the parameters of real solar cells using Lambert W-function,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 81, no. 2, pp. 269–277, 2004.
- [76] M. Planck, “Über eine Verbesserung der Wienschen Spektralgleichung. Verh. dtsh. phys. Ges. Berlin 2, 202-204,” 1900.
- [77] R. G. Ross and C. C. Gonzalez, “Reference Conditions for Reporting Terrestrial Photovoltaic Performance,” *Proceedings of the Annual Meeting - American Section of the International Solar Energy Society*, pp. 1091–1097, 1980.
- [78] R. G. Ross and M. I. Smokler, “Flat-Plate Solar Array Project Final Report,” tech. rep., Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, 1986.
- [79] M. A. Green, “General temperature dependence of solar cell performance and implications for device modelling,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 11, no. 5, pp. 333–340, 2003.
- [80] D. L. King, J. A. Kratochvil, and W. E. Boyson, “Temperature coefficients for PV modules and arrays: measurement methods, difficulties, and results,” in *Conference Record of the 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, no. 26th PVSC, pp. 1183–1186, 1997.
- [81] O. Dupré, R. Vaillon, and M. A. Green, “Physics of the temperature coefficients of solar cells,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 140, pp. 92–100, 2015.
- [82] J. Haschke, J. P. Seif, Y. Riesen, A. Tomasi, J. Cattin, L. Tous, P. Choulat, M. Aleman, E. Cornagliotti, A. Uruena, R. Russell, F. Duerinckx, J. Champliaud, J. Levrat, A. a. Abdallah, B. Aïssa, N. Tabet, N. Wyrsh, M. Despeisse, J. Szlufcik, S. De Wolf, and C. Ballif, “The impact of silicon solar cell architecture and cell interconnection on energy yield in hot & sunny climates,” *Energy Environ. Sci.*, vol. 10, no. 5, pp. 1196–1206, 2017.
- [83] J. A. Schwenzler, L. Rakocevic, R. Gehlhaar, T. Abzieher, S. Gharibzadeh, S. Moghadamzadeh, A. Quintilla, B. S. Richards, U. Lemmer, and U. W. Paetzold, “Temperature Variation-Induced Performance Decline of Perovskite Solar Cells,” *ACS Applied Materials and Interfaces*, vol. 10, no. 19, pp. 16390–16399, 2018.
- [84] X. Sun, M. R. Khan, C. Deline, and M. A. Alam, “Optimization and performance of bifacial solar modules: A global perspective,” *Applied Energy*, vol. 212, pp. 1601–1610, 2018.
- [85] J. A. Galtieri, *Differential power procession for increased solar array energy harvesting*. PhD thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2015.
- [86] H. Hottel and A. Sarofim, *Radiative Transfer*. New York: McGraw-Hill, 1967.
- [87] J. Appelbaum, “View Factors to Grounds of Photovoltaic Collectors,” *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 138, p. 064501, 2016.

- [88] M. A. Green, E. D. Dunlop, D. H. Levi, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, and A. W. Ho-Baillie, "Solar cell efficiency tables (version 54)," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 27, no. 7, pp. 565–575, 2019.
- [89] D. Pérez-del Rey, P. P. Boix, M. Sessolo, A. Hadipour, and H. J. Bolink, "Interfacial Modification for High-Efficiency Vapor-Phase-Deposited Perovskite Solar Cells Based on a Metal Oxide Buffer Layer," *The Journal of Physical Chemistry Letters*, pp. 1041–1046, 2018.
- [90] X. Li, D. Bi, C. Yi, J.-D. Décoppet, J. Luo, S. M. Zakeeruddin, A. Hagfeldt, and M. Grätzel, "A vacuum flash-assisted solution process for high-efficiency large-area perovskite solar cells," *Science (New York, N.Y.)*, vol. 353, no. 6294, pp. 58–62, 2016.
- [91] J. Lehr, M. Langenhorst, R. Schmager, S. Kirner, U. Lemmer, B. S. Richards, C. Case, and U. W. Paetzold, "Energy yield modelling of perovskite/silicon two-terminal tandem PV modules with flat and textured interfaces," *Sustainable Energy & Fuels*, vol. 2, no. 12, pp. 2754–2761, 2018.
- [92] F. Sahli, J. Werner, B. A. Kamino, M. Bräuninger, R. Monnard, B. Paviet-salomon, L. Barraud, L. Ding, J. J. D. Leon, D. Sacchetto, G. Cattaneo, M. Boccard, M. Despeisse, S. Nicolay, Q. Jeangros, B. Niesen, and C. Ballif, "Fully textured monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with 25.2% power conversion efficiency," *Nature Materials*, vol. 17, no. 9, pp. 820–826, 2018.
- [93] E. Köhnen, M. Jošt, A. B. Morales-Vilches, P. Tockhorn, A. Al-Ashouri, B. Macco, L. Kegelmann, L. Korte, B. Rech, R. Schlattmann, B. Stannowski, and S. Albrecht, "Highly efficient monolithic perovskite silicon tandem solar cells: analyzing the influence of current mismatch on device performance," *Sustainable Energy and Fuels*, vol. 3, no. 8, pp. 1995–2005, 2019.
- [94] G. Nogay, F. Sahli, J. Werner, R. Monnard, M. Boccard, M. Despeisse, F.-J. Haug, Q. Jeangros, A. Ingenito, and C. Ballif, "25.1%-Efficient Monolithic Perovskite/Silicon Tandem Solar Cell Based on a p-type Monocrystalline Textured Silicon Wafer and High-Temperature Passivating Contacts," *ACS Energy Letters*, vol. 4, no. 4, pp. 844–845, 2019.
- [95] W. S. Yang, B.-W. Park, E. H. Jung, N. J. Jeon, Y. C. Kim, D. U. Lee, S. S. Shin, J. Seo, E. K. Kim, J. H. Noh, and S. I. Seok, "Iodide management in formamidinium-lead-halide-based perovskite layers for efficient solar cells," *Science (New York, N.Y.)*, vol. 356, no. 6345, pp. 1376–1379, 2017.
- [96] M. C. Peel, B. L. Finlayson, and T. A. McMahon, "Updated World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification," *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, vol. 4, no. 2, pp. 439–473, 2007.
- [97] M. Langenhorst, B. Sautter, R. Schmager, J. Lehr, E. Ahlswede, M. Powalla, U. Lemmer, B. S. Richards, and U. W. Paetzold, "Energy yield of all thin-film perovskite/CIGS tandem solar modules," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 27, no. 4, pp. 290–298, 2018.

- [98] S. Gharibzadeh, B. Abdollahi Nejad, M. Jakoby, T. Abzieher, D. Hauschild, S. Moghadamzadeh, J. A. Schwenzer, P. Brenner, R. Schmager, A. A. Haghighirad, L. Weinhardt, U. Lemmer, B. S. Richards, I. A. Howard, and U. W. Paetzold, "Record Open-Circuit Voltage Wide-Bandgap Perovskite Solar Cells Utilizing 2D/3D Perovskite Heterostructure," *Advanced Energy Materials*, vol. 9, no. 21, p. 1803699, 2019.
- [99] A. Ho-Baillie, "Perovskites cover silicon textures," *Nature Materials*, vol. 17, no. 9, pp. 751–752, 2018.
- [100] Y. Hou, E. Aydin, M. De Bastiani, C. Xiao, F. H. Isikgor, D.-J. Xue, B. Chen, H. Chen, B. Bahrami, A. H. Chowdhury, A. Johnston, S.-W. Baek, Z. Huang, M. Wei, Y. Dong, J. Troughton, R. Jalmood, A. J. Mirabelli, T. G. Allen, E. Van Kerschaver, M. I. Saidaminov, D. Baran, Q. Qiao, K. Zhu, S. De Wolf, and E. H. Sargent, "Efficient tandem solar cells with solution-processed perovskite on textured crystalline silicon," *Science*, vol. 367, no. 6482, pp. 1135–1140, 2020.
- [101] B. Chen, Z. J. Yu, S. Manzoor, S. Wang, W. Weigand, Z. Yu, G. Yang, Z. Ni, X. Dai, Z. C. Holman, and J. Huang, "Blade-Coated Perovskites on Textured Silicon for 26%-Efficient Monolithic Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells," *Joule*, vol. 4, no. 3, pp. 615–630, 2020.
- [102] D. A. Jacobs, M. Langenhorst, F. Sahli, B. S. Richards, T. P. White, C. Ballif, K. R. Catchpole, and U. W. Paetzold, "Light Management : A Key Concept in High- Efficiency Perovskite / Silicon Tandem Photovoltaics," *J. Phys. Chem. Lett.*, vol. 10, pp. 3159–3170, 2019.
- [103] P. Tockhorn, P. Wagner, L. Kegelmann, J.-C. Stang, M. Mews, S. Albrecht, and L. Korte, "Three-Terminal Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells with Top and Interdigitated Rear Contacts," *ACS Applied Energy Materials*, vol. 3, no. 2, pp. 1381–1392, 2020.
- [104] R. Kopecek and J. Libal, "Towards large-scale deployment of bifacial photovoltaics," *Nature Energy*, vol. 3, no. 6, pp. 443–446, 2018.
- [105] A. Hübner, A. G. Aberle, and R. Hezel, "Novel cost-effective bifacial silicon solar cells with 19.4% front and 18.1% rear efficiency," *Applied Physics Letters*, vol. 70, no. 8, pp. 1008–1010, 1997.
- [106] Y. Xiao, G. Han, J. Wu, and J.-Y. Lin, "Efficient bifacial perovskite solar cell based on a highly transparent poly(3,4-ethylenedioxythiophene) as the p-type hole-transporting material," *Journal of Power Sources*, vol. 306, pp. 171–177, 2016.
- [107] M. R. Khan and M. A. Alam, "Thermodynamic limit of bifacial double-junction tandem solar cells," *Applied Physics Letters*, vol. 107, no. 22, 2015.
- [108] J. Lehr, M. Langenhorst, R. Schmager, F. Gota, S. Kirner, U. Lemmer, B. S. Richards, C. Case, and U. W. Paetzold, "Energy yield of bifacial textured perovskite/silicon tandem photovoltaic modules," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 208, p. 110367, 2020.
- [109] T. Abzieher, S. Moghadamzadeh, F. Schackmar, H. Eggers, F. Sutterlüti, A. Farooq, D. Kojda, K. Habicht, R. Schmager, A. Mertens, R. Azmi, L. Klotz, J. A. Schwenzer, M. Hetterich,

- U. Lemmer, B. S. Richards, M. Powalla, and U. W. Paetzold, "Electron-Beam-Evaporated Nickel Oxide Hole Transport Layers for Perovskite-Based Photovoltaics," *Advanced Energy Materials*, vol. 9, no. 12, pp. 1–13, 2019.
- [110] M. Jaysankar, B. A. L. Raul, J. Bastos, C. Burgess, C. Weijtens, M. Creatore, T. Aernouts, Y. Kuang, R. Gehlhaar, A. Hadipour, and J. Poortmans, "Minimizing Voltage Loss in Wide-Bandgap Perovskites for Tandem Solar Cells," *ACS Energy Letters*, vol. 4, no. 1, pp. 259–264, 2019.
- [111] T. Duong, Y. L. Wu, H. Shen, J. Peng, X. Fu, D. Jacobs, E. C. Wang, T. C. Kho, K. C. Fong, M. Stocks, E. Franklin, A. Blakers, N. Zin, K. McIntosh, W. Li, Y. B. Cheng, T. P. White, K. Weber, and K. Catchpole, "Rubidium Multication Perovskite with Optimized Bandgap for Perovskite-Silicon Tandem with over 26% Efficiency," *Advanced Energy Materials*, vol. 7, no. 14, pp. 1–11, 2017.
- [112] M. Jaysankar, W. Qiu, M. van Eerden, T. Aernouts, R. Gehlhaar, M. Debucquoy, U. W. Paetzold, and J. Poortmans, "Four-Terminal Perovskite/Silicon Multijunction Solar Modules," *Advanced Energy Materials*, vol. 7, no. 15, p. 1602807, 2017.
- [113] A. Calcabrini, H. Ziar, O. Isabella, and M. Zeman, "A simplified skyline-based method for estimating the annual solar energy potential in urban environments," *Nature Energy*, vol. 4, pp. 206–215, 2019.
- [114] K. Brecl and M. Topič, "Self-shading losses of fixed free-standing PV arrays," *Renewable Energy*, vol. 36, no. 11, pp. 3211–3216, 2011.
- [115] A. Mermoud, "Optimization of row-arrangement in PV Systems, shading loss evaluations according to module positioning and connexions," in *27th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, no. September, (Frankfurt), 2012.
- [116] M. R. Khan, A. Hanna, X. Sun, and M. A. Alam, "Vertical bifacial solar farms: Physics, design, and global optimization," *Applied Energy*, vol. 206, pp. 240–248, 2017.
- [117] L. Kreinin, N. Bordin, A. Karsenty, A. Drori, D. Grobgeld, and N. Eisenberg, "PV module power gain due to bifacial design. Preliminary experimental and simulation data.," in *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 2171–2175, IEEE, 2010.
- [118] Solarworld, "Calculating the Additional Energy Yield of Bifacial Solar Modules," pp. 1–8, 2016.
- [119] O. Dupre, A. Tuomiranta, Q. Jeangros, M. Boccard, P.-J. Alet, and C. Ballif, "Design Rules to Fully Benefit From Bifaciality in Two-Terminal Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells," *IEEE Journal of Photovoltaics*, pp. 1–8, 2020.
- [120] Q. Wang, Y. Xie, F. Soltani-Kordshuli, and M. Eslamian, "Progress in emerging solution-processed thin film solar cells - Part I: Polymer solar cells," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 347–361, 2016.

- [121] J. You, X. Li, F.-x. Xie, W. E. I. Sha, J. H. W. Kwong, G. Li, W. C. H. Choy, and Y. Yang, “Surface Plasmon and Scattering-Enhanced Low-Bandgap Polymer Solar Cell by a Metal Grating Back Electrode,” *Advanced Energy Materials*, vol. 2, no. 10, pp. 1203–1207, 2012.
- [122] M.-G. Kang, M.-S. Kim, J. Kim, and L. J. Guo, “Organic Solar Cells using Nanoimprinted Transparent Metal Electrodes,” *Advanced Materials*, vol. 20, no. 23, pp. 4408–4413, 2008.
- [123] R. Betancur, P. Romero-Gomez, A. Martinez-Otero, X. Elias, M. Maymó, and J. Martorell, “Transparent polymer solar cells employing a layered light-trapping architecture,” *Nature Photonics*, vol. 7, no. 12, pp. 995–1000, 2013.
- [124] J. Lehr, A. Mertens, Q. Liu, J. Martorell, U. W. Paetzold, and U. Lemmer, “Numerical study on the angular light trapping of the energy yield of organic solar cells with an optical cavity,” *Optics Express*, vol. 28, no. 25, pp. 37986 – 37995, 2020.
- [125] B. Godefroid and G. Kozyreff, “Photonic enhancement of parallel homo-tandem solar cells through the central electrode,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 193, pp. 73–79, 2019.
- [126] W. Yu, X. Jia, Y. Long, L. Shen, Y. Liu, W. Guo, and S. Ruan, “Highly Efficient Semi-transparent Polymer Solar Cells with Color Rendering Index Approaching 100 Using One-Dimensional Photonic Crystal,” *ACS Applied Materials and Interfaces*, vol. 7, no. 18, pp. 9920–9928, 2015.
- [127] G. Sun, M. Shahid, Z. Fei, S. Xu, F. D. Eisner, T. D. Anthopolous, M. A. McLachlan, and M. Heaney, “Highly-efficient semi-transparent organic solar cells utilising non-fullerene acceptors with optimised multilayer MoO₃/Ag/MoO₃ electrodes,” *Materials Chemistry Frontiers*, vol. 3, no. 3, pp. 450–455, 2019.
- [128] P. Heinstejn, C. Ballif, and L.-E. Perret-Aebi, “Building Integrated Photovoltaics (BIPV): Review, Potentials, Barriers and Myths,” *Green*, vol. 3, no. 2, pp. 125–156, 2013.
- [129] M. Langenhorst, M. F. Schumann, R. Schmager, J. Lehr, U. Lemmer, M. Wegener, B. Richards, and U. W. Paetzold, “Performance of silicon solar cells with cloaked contact fingers under realistic conditions,” in *Light, Energy and the Environment*, pp. 2–4, Optical Society of America, 2017.
- [130] C. Deline, S. MacAlpine, B. Marion, F. Toor, A. Asgharzadeh, and J. S. Stein, “Assessment of Bifacial Photovoltaic Module Power Rating Methodologies - Inside and Out,” *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2017*, vol. 7, no. 2, pp. 575–580, 2017.
- [131] I. Haedrich, D. C. Jordan, and M. Ernst, “Methodology to predict annual yield losses and gains caused by solar module design and materials under field exposure,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 202, no. May, p. 110069, 2019.

Publikationsliste

Veröffentlichungen in referierten Fachjournalen

- **J. Lehr**, A. Mertens, Q. Liu, J. Martorell, U. W. Paetzold, U. Lemmer, *Numerical study on the angular light trapping of the energy yield of organic solar cells with an optical cavity*, Optics Express, 28, 37986-37995 (2020)
- F. Gota, M. Langenhorst, R. Schmager, **J. Lehr**, U. W. Paetzold, *Energy Yield Advantages of Three-Terminal Perovskite-Silicon Tandem Photovoltaics*, Joule, 4, 2387-2403 (2020)
- **J. Lehr**, M. Langenhorst, R. Schmager, F. Gota, S. Kirner, U. Lemmer, B. S. Richards, C. Case, U. W. Paetzold, *Energy yield of bifacial textured perovskite/silicon tandem photovoltaic modules*, Solar Energy Materials and Solar Cells, 208, 110367 (2020)
- R. Schmager, M. Langenhorst, **J. Lehr**, U. Lemmer, B. S. Richards, U. W. Paetzold, *Methodology of energy yield modelling of perovskite-based multi-junction photovoltaics*, Optics Express, 27, 507-523 (2019)
- M. Langenhorst, B. Sautter, R. Schmager, **J. Lehr**, E. Ahlswede, M. Powalla, U. Lemmer, B. S. Richards, U. W. Paetzold, *Energy yield of all thin-film perovskite/CIGS tandem solar modules*, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 27, 290-298 (2018)
- **J. Lehr**, M. Langenhorst, R. Schmager, S. Kirner, U. Lemmer, B. S. Richards, C. Case, U. W. Paetzold, *Energy yield modelling of perovskite/silicon two-terminal tandem PV modules with flat and textured interfaces*, Sustainable Energy & Fuels, 2, 2754-2761 (2018)
- N. Strobel, R. Eckstein, **J. Lehr**, U. Lemmer, G. Hernandez-Sosa, *Semiconductor:Insulator Blends for Speed Enhancement in Organic Photodiodes*, Advanced Electronic Materials, 4, 1700345 (2018)

Konferenzbeiträge

- F. Gota, M. Langenhorst, **J. Lehr**, R. Schmager, U. Lemmer, B. S. Richards, U. W. Paetzold, *Energy Yield Modelling of Perovskite-Based Tandem Photovoltaics*, European PV Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC) (2019)
- M. Langenhorst, **J. Lehr**, B. Sautter, R. Schmager, U. Lemmer, B. S. Richards, U. W. Paetzold, *Energy Yield Modelling of Wide Bandgap Perovskite-Based Tandem Solar Modules*, Light, Energy and the Environment, OW5C.3 (2018)
- M. Langenhorst, M. F. Schumann, R. Schmager, **J. Lehr**, U. Lemmer, M. Wegener, B. S. Richards, U. W. Paetzold, *Performance of silicon solar cells with cloaked contact fingers under realistic conditions*, Light, Energy and the Environment, PW2A.3 (2017)

Vorträge auf internationalen Konferenzen

- **J. Lehr**, M. Langenhorst, R. Schmager, U. Lemmer, B. S. Richards, U. W. Paetzold, *Energy Yield Modelling of Textured Perovskite/Silicon Two-Terminal Tandem Photovoltaic Modules*, International Conference on Perovskite Solar Cells, Photonics and Optoelectronics (NIPHO) (2019)
- **J. Lehr**, A. Quintilla, U. Lemmer, *Laser pulsed transient photo currents on perovskites to study charge carrier transport*, International Conference on Simulation of Organic Electronics and Photovoltaics (SimOEP) (2016)

Betreute studentische Arbeiten

- Valerie Horter, *Optische und elektronische Charakterisierung von Perowskit-Solarzellen*, Bachelorarbeit im Studiengang Elektrotechnik und Informationstechnik (2019)
- Johannes Bläsi, *Transient Photocurrent Measurements on PCDTBT:PCBM Organic Diodes*, Forschungsprojekt im Studiengang Optics & Photonics (2016)

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beitragen und welche eine gute Zusammenarbeit in den verschiedensten Bereichen am Lichttechnischen Institut (LTI) möglich machten.

- Ich danke an erster Stelle meinem Doktorvater Prof. Dr. Uli Lemmer für die Betreuung und die wertvolle Unterstützung bei dieser wissenschaftlichen Arbeit. Er ermöglichte erst diese Arbeit und förderte sie durch sein Wissen, seine Erfahrung und durch seine wertvollen Ratschläge.
- Ich danke Prof. Dr. Heinz Kalt vom Institut für Angewandte Physik (APH) für die Übernahme des Korreferats.
- Ich danke Dr. Uli Paetzold für die wertvolle Betreuung und Ratschläge sowie für die außerordentlich gute Zusammenarbeit. Seine Unterstützung und Koordination trugen maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit bei.
- Ich danke Prof. Dr. Bryce Richards für die wissenschaftlichen Ratschläge, welche zur Qualität dieser Arbeit beitrugen.
- Ich möchte mich bei Dr. Aina Quintilla für die gute Zusammenarbeit und die hilfreichen Diskussionen über Perowskit-Solarzellen bedanken.
- Ich bedanke mich bei Malte Langenhorst und Raphael Schmager für die ausgezeichnete Zusammenarbeit beim Programmieren und Schneiden des Simulationsmodells sowie für ihre stets guten Ratschläge.
- Vielen Dank an Dr. Simon Kirner von Oxford Photovoltaics für die inhaltliche Auseinandersetzung sowie für die wertvollen Hinweise über Perowskit-Silizium Tandem-Solarzellen.
- Vielen Dank an Dr. Quan Liu vom Institut de Ciències Fòniques (ICFO), The Barcelona Institute of Science and Technology, Spanien für die stets offenen wissenschaftlichen Diskussionen über organische Solarzellen.
- Vielen Dank an Noah Strobel und Dr. Gerardo Hernandez-Sosa vom InnovationLab in Heidelberg für die Diskussionen über organische Solarzellen sowie die gute wissenschaftliche Zusammenarbeit.
- Ich danke den Studenten Johannes Bläsi und Valerie Horter für die gute Zusammenarbeit und das Mitwirken an meinen Forschungsthemen.
- Für die stets gute Versorgung mit Proben danke ich vielmals Dr. Aina Quintilla, Philipp Brenner, Holger Röhm, Konstantin Glaser, Ihtez Hossain, Somayeh Moghadamzadeh,

Saba Gharibzadeh, Sebastian Raupp vom Institut für Thermische Verfahrenstechnik (TFT) und Lisa Merklein vom TFT.

- Für gemeinsame Messungen und Analysen an thermisch stimulierten Strömen bedanke ich mich bei Dr. Nathan Shewmon.
- Ich bedanke mich bei allen Kollegen und Mitstreitern am LTI und insbesondere bei Philipp Brenner, Siegfried Kettlitz, Jan Mescher, Andreas Arndt, Amos Egel, Carola Moosmann, Adrian Mertens, Diana Rueda-Delgado, Jonas Schwenzer, Bernd Ebenhoch, Daniel Bahro, Christian Sprau, Dominik Theobald, Henning Mescher, Isabel Allegro und Fabrizio Gota für die vielen wissenschaftlichen Diskussionen sowie für die tolle gemeinsame Zeit am Institut.
- Für die gute kollegiale Zusammenarbeit in der IT-Administration des LTI danke ich meinen Kollegen Siegfried Kettlitz, Carsten Eschenbaum und Dominik Theobald.
- Den Hardware-Beauftragten des LTI Martin Perner, Patric Jahn und Maximilian Baumann danke ich für die gute Zusammenarbeit an der Schnittstelle zwischen Hardware und IT-Administration.
- Ich danke den Sekretärinnen Astrid Henne und Claudia Holeisen für ihre Hilfsbereitschaft bei Fragen zu Bestellungen, Verträgen und Formularen sowie für jedes auflockernde Gespräch zwischendurch.
- Ich danke Felix Geislhöringer für die Anfertigung und die Reparaturen von Platinen und elektrischen Schaltungen für Messapparaturen sowie für seine allgemeine vorbildliche Hilfsbereitschaft am Institut.
- Ich danke Christian Kayser für die gute Zusammenarbeit bei der Integration der Messplätze im Reinraum.
- Den Laserlabor-Verantwortlichen Patrick Schwab, Anne Habermehl und Isabel Allegro danke ich für die Ratschläge im Umgang mit Lasern sowie für die Betreuung der Labore.
- Für ihre besondere Hilfsbereitschaft rund um die Wissenschaft und das Institut danke ich meinen Kollegen Andres Rösch, Robert Huber und Andre Gall.