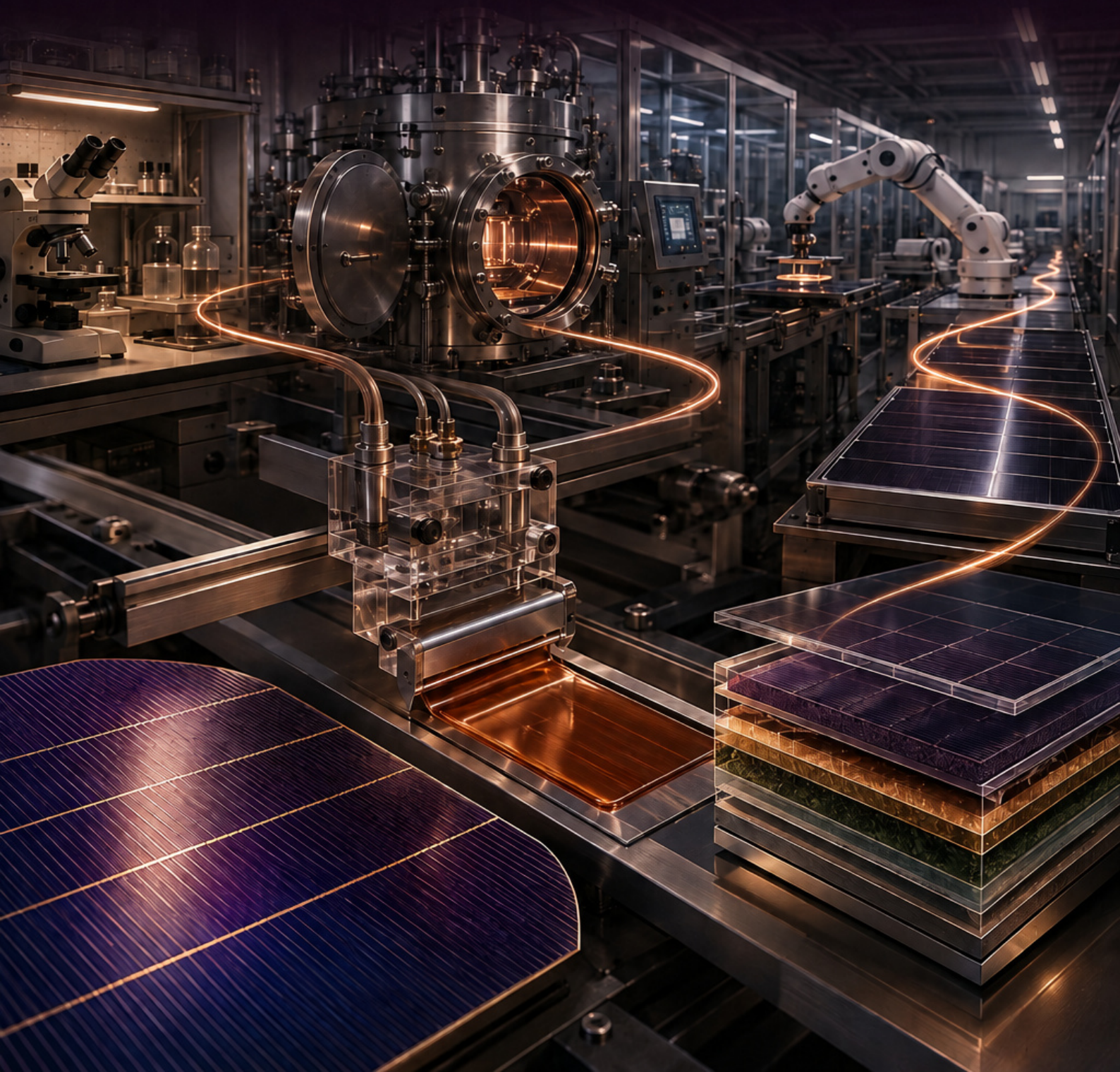


BUCH II

PV-Entwicklung

Methoden, Fertigungsprozesse und Unternehmen



Impressum und Anmerkungen für den Leser

Alper Ferudun • Mercury Software GmbH

Deutsche Lehrausgabe • 9. September 2026

Dieses Buch wurde entwickelt, um Leser, die keine Vorkenntnisse im Bereich der Fotovoltaik haben, von grundlegenden Konzepten zu Forschungsfragen zu führen. In historischen Experimenten werden Aufbau und Beobachtung erläutert; bei technischen Themen werden Mechanismus, Einheit, Beispiel und Modellgrenzen gemeinsam erklärt. Nach den einführenden Erklärungen werden detailliertere Aspekte behandelt.

CC BY 4.0 • Lizenz und Quellenangabe

Sofern nicht anders angegeben, werden die Urheber- und ähnlichen Rechte, zu deren Lizenzierung der Herausgeber berechtigt ist, unter der Creative Commons Attribution 4.0 International Lizenz bereitgestellt. Die kommerzielle Nutzung, Weitergabe, Übersetzung und Bearbeitung sind erlaubt. Behalten Sie die Nennung von Alper Ferudun und Mercury Software GmbH, den Link zur Quelle und zur Lizenz sowie die Urheberrechts- und Garantiehinweise bei; geben Sie Änderungen an. Geben Sie nicht den Eindruck, dass der Herausgeber Ihre Nutzung unterstützt; wenden Sie keine zusätzlichen Bedingungen oder digitalen Sperren an, die die zulässigen Nutzungsarten einschränken.

Creative-Commons-Lizenztext BY 4.0 • EulerSolve-Bibliothek

Die in der Bibliografie aufgeführten Werke Dritter, Marken- und Patentrechte sowie Schriftarten-Software werden durch diese Erklärung nicht erneut lizenziert. Die Freiheiten für gemeinfreie Elemente bleiben erhalten. In Bezug auf Elemente der künstlichen Intelligenz schafft diese Erklärung keine neuen Rechte, sofern keine Urheberrechte entstehen. Das Werk wird im Umfang, der durch das Gesetz zulässig ist, „wie besehen“ bereitgestellt; es werden keine Zusicherungen hinsichtlich Richtigkeit oder bestimmter Ergebnisse gegeben.

Redaktionelle Leitung und Veröffentlichung: Alper Ferudun. Für die Erstellung von Text und Bildmaterial wurden Tools von OpenAI verwendet. Die konzeptionellen Illustrationen sind keine Fotos von realen Proben; numerische Beispiele sind synthetisch, sofern nicht anders angegeben. Das Werk erhebt keinen Anspruch auf eine begutachtete Veröffentlichung oder experimentelle Validierung. Es wird nicht behauptet, dass die gesamte verfügbare Literatur durchsucht wurde; die Einschränkungen beim Zugriff auf die Quellen werden in den entsprechenden Angaben erläutert.

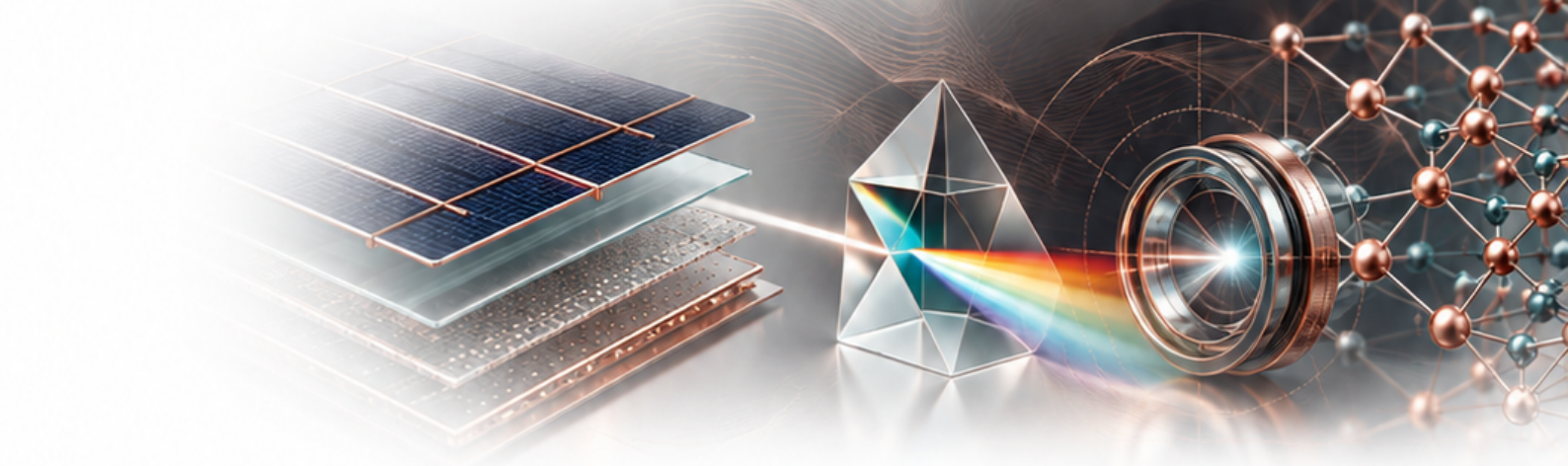
Zitierempfehlung: Ferudun, A. (Hrsg.). (2026). PV-Entwicklung: Methoden, Fertigung und Unternehmen. Übersetzung der türkischen Lehrbuchrevision vom 9. September 2026. Institutionelle Zugehörigkeit: Mercury Software GmbH. Geben Sie das verwendete Kapitel und die gedruckte Seite an.



Inhaltsverzeichnis

Kapiteltitel und Seitenzahlen sind anklickbar. Dieser Band ist ein eigenständiges Buch einer zweibändigen Reihe.

BUCH II · PV-Entwicklung	1
II.01 Photovoltaik-Technologie weiterentwickeln: Ziel, Verlust und Nachweis auf einen Nenner bringen	6
II.02 Entwicklungslabor: Zuerst darauf vertrauen, dass die Messungen korrekt sind	12
II.03 Siliziumweg: Vom Rohmaterial zum gereinigten und strukturierten Wafer	19
II.04 TOPCon-Entwicklung: Ziel ist es, eine gute Passivierung mit einer guten Leitfähigkeit zu kombinieren	26
II.05 Entwicklung von Heteroübergängen: selektive Kontaktentwicklung bei niedrigen Temperaturen	32
II.06 Rückkontaktzellen: Muster, Isolierung und Transportweg	38
II.07 Perowskit-Entwicklung: von der Zusammensetzung über die Tinte bis zum homogenen Film	45
II.08 Tandem-Entwicklung: Die Kombination von zwei hochwertigen Zellen zu einem hochwertigen Produkt	54
II.09 Weitere Entwicklungsmöglichkeiten: CdTe, CIGS, III-V-Halbleiter und Lösungstechnologien	62
II.10 Die gleichzeitige Optimierung von Optik, Passivierung und Kontakten	70
II.11 Versuchsplanung: von der guten Probe zum zuverlässigen Prozessfenster	76
II.12 Verbesserung der Beständigkeit und Ermittlung des Ausfallmechanismus	83
II.13 Von der Zelle zum Modul: Verbindung, Verkapselung und Pilotfertigung	89
II.14 Skalierung: Kapazität, verkaufsfähige Watt und Prozesswirtschaftlichkeit	95
II.15 Berechnungsgestützte Entwicklung: Vom potenziellen Material zum testbaren Bauelement	100
II.16 Firmenübersicht: Welche Technologie wird von wem in welchem Reifegrad entwickelt?	106
II.17 Forschungsinfrastruktur, Ausrüstung und Kooperationsmodelle	116
II.18 Forschungsprogramm: drei Fallstudien, Entscheidungspunkte und Arbeitsblätter	121
II · Literaturverzeichnis und Zugangshinweise	128



Abbildungsverzeichnis

Abbildungen und berechnete Diagramme im Text. Unter jeder Abbildung ist die konzeptionelle Erläuterung, das Modell oder die Datenquelle angegeben.

01 Prozesskette vom Kristall zur Zellvorstufe	20
02 Schematische Vergrößerung eines TOPCon-Rückkontakts	27
03 Eine typische Schichtfolge für eine HJT-Zelle, die n-dotiertes kristallines Silizium verwendet	33
04 Bei der Gestaltung der Rückkontakte haben die Optik der Vorderseite und das Muster der Rückseite unterschiedliche Funktionen	39
05 Vier repräsentative Verfahren zur Herstellung von Perowskit-Beschichtungen	47
06 In der 2T-Struktur sind die Teilzellen elektrisch in Reihe geschaltet; in der 4T-Struktur gibt es zwei unabhängige Betriebspunkte	56
07 Beispiel einer Anordnung, in der faktorielle Bedingungen auf Tagesblöcke verteilt sind	77
08 Repräsentative Schichten und kritische Grenzflächen eines Glas-Glas-Moduls, das kristallines Silizium verwendet	90

Wie dieses Buch zu nutzen ist

Das erste Buch legt die physikalischen Grundlagen. Dieses Buch behandelt die Auswahl der Methode, die Durchführung kontrollierter Experimente, die Diagnose von Prozessverlusten und die Übertragung des Ergebnisses in die Produktion. Alle numerischen Lehrbeispiele sind im Text synthetisch oder hypothetisch dargestellt.

Umfang der Quellenbasis

Dieses Werk vereint ausgewählte grundlegende Veröffentlichungen, methodische Studien, offizielle Forschungsquellen, Normenkataloge und datierte Unternehmensmitteilungen. Es erhebt keinen Anspruch auf eine lückenlose Erfassung der gesamten PV-Literatur. Letzter Zugriff auf Unternehmens- und Prozessquellen: 8. September 2026. War von einem Primärtext nur die Zusammenfassung zugänglich, ist dies im Literaturverzeichnis vermerkt.

Lesewege

Bedarf	Vorrangige Kapitel
Entwicklung von Siliziumzellen	II.01-06, II.10-14
Perowskit und Tandem	II.01-02, II.07-08, II.11-15
Alternative Technologien	II.09-10, II.12-15
Unternehmen und Forschungsplanung	II.16-18; das Kapitel zum jeweiligen Fertigungsverfahren

Photovoltaik-Technologie weiterentwickeln: Ziel, Verlust und Nachweis auf einen Nenner bringen

Die Frage dieses Bandes: Was verändern wir, und was gewinnen wir dadurch?

Die Entwicklung einer Solarzelle ist mehr als nur das Ausprobieren neuer Materialnamen. Das **Produkt** ist das Objekt, das wir schließlich für eine bestimmte Aufgabe einsetzen wollen: ein kleines Sensor-Netzteil, ein Dachmodul oder eine Weltraumzelle sind unterschiedliche **Ziele**. Der **Prozess** ist die Abfolge von Schritten, die von den Rohmaterialien bis zum fertigen **Bauelement** durchgeführt werden. Das **Rezept** definiert die Material-, Geräte-, Zeit-, Temperatur- und ähnliche Einstellungen für einen bestimmten Prozessschritt. Das **Prozessfenster** ist der Bereich von Bedingungen, innerhalb dessen akzeptable Produkte auch bei geringfügigen Abweichungen erzielt werden können. Das Ziel der Entwicklung ist es, von einer einzelnen, guten Probe zu diesem zuverlässigen Bereich zu gelangen.

Für den Leser, der zum ersten Mal mit diesem Band beginnt, wollen wir die physikalische Kette kurz zusammenfassen. Licht erzeugt in einem geeigneten Halbleiter bewegliche Elektronen und Löcher. Ein Loch ist der Zustand, in dem ein Elektron fehlt, und wir betrachten es als einen positiven Ladungsträger. Selektive Kontakte leiten diese beiden Ladungsträger zu den entsprechenden Anschlüssen. Die Ladung überträgt Energie im äußeren Stromkreis. Die Herstellung muss Ladungsträgererzeugung, verlustarme Sammlung und elektrische Verbindung erfolgreich zusammenführen. Detaillierte Band- und Ladungsträgerbeschreibungen finden sich in den ersten neun Kapiteln des ersten Bandes.

Das Verlustbudget ist eine Ursachenübersicht

Das **Verlustbudget** zerlegt die Differenz zwischen dem idealen oder referenziellen Zustand und der tatsächlichen Leistung in einzelne Komponenten. Die Reflexion von Licht ist optisch; der frühe Verlust erzeugter Ladungsträger ist Rekombination; der Widerstand im Leitungspfad ist elektrisch; und die Produktion fehlerhafter Produkte ist ein Prozessverlust. Das gleiche Symptom, nämlich eine „geringer Wirkungsgrad“, kann durch sehr unterschiedliche Ursachen entstehen. Die richtige Optimierungsmethode wird durch die Identifizierung der dominanten Verlustquelle ausgewählt.

Synthetisches Beispiel: Nehmen wir an, die akzeptierten Zelleistungen in den beiden Prozessen betragen 5 W bzw. 5,2 W. Im ersten Prozess werden 95 von 100 Zellen akzeptiert, im zweiten Prozess 80. Die insgesamt produzierte, akzeptierte Leistung beträgt 475 W bzw. 416 W. Obwohl die beste Zelleistung gestiegen ist, ist die akzeptierte Leistung pro anfänglicher Stückzahl gesunken. Die hier verwendete **Akzeptanzrate** ist das Verhältnis der Produkte, die die Spezifikationen erfüllen, zur Gesamtanzahl der Produkte; sie unterscheidet sich vom Energieumwandlungswirkungsgrad.

Eine **Hypothese** ist eine Erklärung, die ein messbares Ergebnis vorhersagt: „Die Rekombination an der Rückseite begrenzt die Spannung; dieser Prozess wird dies reduzieren.“ Die **Kontrollgruppe** ist eine andere, aber ansonsten identische Probe, bei der dieser Prozess nicht durchgeführt wird. Das **Entscheidungskriterium** ist, welche Veränderung ausreichend ist, um auf die neue Methode umzusteigen. Die folgenden Entwicklungsschritte ordnen diese Konzepte in die tatsächliche Reihenfolge des Arbeitsprozesses ein.

Verständniskontrolle: Welcher Wirkungsgrad hat sich erhöht?

Bevor Sie den Satz „Der Wirkungsgrad 4 % hat zugenommen“ akzeptieren, fragen Sie, ob es sich dabei um die Energieumwandlungsrate, Prozentpunkte, die Akzeptanzrate oder die Produktionsrate pro Stunde handelt. Eine Entscheidung über eine Verbesserung sollte auf einem klar definierten Kriterium mit einem Zähler und einem Nenner basieren.

Das erste Buch legte die Grundlage dafür, warum ein photovoltaisches Bauelement funktioniert. Dieses Buch behandelt, wie wir dieses Wissen nutzen können, um ein Bauelement weiterzuentwickeln. Die Weiterentwicklung kann darin bestehen, einen neuen Absorber zu finden, die Kontaktverluste der bestehenden Zelle zu reduzieren, eine Beschichtung auf eine größere Fläche zu übertragen oder die Stabilität des Moduls unter Feuchtigkeitseinfluss zu erhöhen. Diese Aufgaben erfordern unterschiedliche Ausrüstungen, aber alle erfordern die gleiche Forschungsdisziplin: ein messbares Ziel, ein zuverlässiger Ausgangsprozess, eine begründete Intervention, eine vergleichbare Kontrolle und eine vordefinierte Entscheidung.

Dieses Buch ist kein Katalog mit Fabrikrezepten. Die von Unternehmen nicht offengelegten Temperatur-, Gasfluss-, Tintenzusammensetzungs- oder Prozesstoleranzen wurden nicht erfunden. Die angegebenen Arbeitsabläufe sind auf veröffentlichten physikalischen und prozessualen Grundlagen basierende Schulungsentwürfe; die in den numerischen Beispielen verwendeten Annahmen werden zusätzlich angegeben. Das vollständige Produktionsrezept wird zusammen mit den Eigenschaften der verwendeten Geräte und Chemikalien im Labor verifiziert. Die

Gleichungen aus dem Einführungskapitel werden hier zur Entscheidungsfindung erneut verwendet.

Definieren Sie zunächst, welches Produkt Sie entwickeln

Bei einem Gebäude mit begrenzter Dachfläche wird die Leistung pro Quadratmeter immer wichtiger. Bei einem Dach mit geringer Tragfähigkeit können die Modulmasse und die Montageart entscheidend sein. Bei einem Innenraumsensor sind vor dem Wirkungsgrad im Standard-Sonnenspektrum das Spektrum der tatsächlichen Beleuchtung, der Leckstrom bei geringer Einstrahlung und die Schwellenspannung der Speicherstufe von Bedeutung. Dieselbe Zelle ist möglicherweise nicht die beste Wahl für all diese Anwendungen. Die Beschreibung der Produktionskette des US-Energieministeriums zeigt auch, dass sowohl die Wafer-basierten als auch die Dünnschicht-Produktionswege aus unterschiedlichen Prozessschritten bestehen. [D01]

Die erste Seite der Entwicklungsdokumentation muss die folgenden fünf Fragen beantworten: Wo wird das Produkt eingesetzt? Mit welcher bestehenden Lösung wird es verglichen? In welchem Maßstab wird es produziert? Unter welchen Bedingungen wird es als fehlgeschlagen betrachtet? Mit welcher unabhängigen Messung wird der Erfolg verifiziert? „Wir werden hochwirksames Perowskit herstellen“ ist als Forschungsziel unzureichend. „Wir werden einen Grenzflächenprozess entwickeln, der unter den gleichen Substrat- und Messbedingungen im Vergleich zum Referenzprozess eine stabile maximale Leistungssteigerung ermöglicht und in unabhängigen Produktionschargen reproduzierbar ist“, ist ein funktionellerer Ausgangspunkt.

Entscheidungsdimension	Zu speicherndes Ziel.	Falsche Abkürzung.
Leistung	Flächendefinition, Spektrum, Temperatur, stationäre Leistung und Unsicherheit.	Nur den besten Rückwärtsscan auswählen
Beständigkeit	Beanspruchung, elektrischer Betriebspunkt, Dauer, Verteilung der Leistungserhaltung	Die Lagerdauer als Betriebszeit ansehen.
Herstellbarkeit	Fläche, Chargengröße, Gutanteil, Zykluszeit	Ein erfolgreiches Pixel als Beweis für die Serienfertigung betrachten.
Ressourcennutzung	Materialverbrauch, Energie, Prozessschritt, Abfall	Nur den Preis des Absorberrohstoffs betrachten
Konformität	Modulstruktur, Testumfang, Anwendungsbedingungen	Eine Komponentenzertifizierung auf das gesamte Produkt übertragen.

Ein Verlustbudget erstellen

Die Effizienz einer Zelle wird nicht durch drei unabhängige Einstellparameter bestimmt; Kurzschlussstrom, Leerlaufspannung und Füllfaktor sind an die gleiche physikalische Struktur gebunden. Dennoch kann die logarithmische Analyse kleiner Veränderungen dazu beitragen, die Prioritäten für die Forschung festzulegen:

$$\eta = \frac{J_{sc} V_{oc} FF}{G}, \quad \frac{\Delta \eta}{\eta} \approx \frac{\Delta J_{sc}}{J_{sc}} + \frac{\Delta V_{oc}}{V_{oc}} + \frac{\Delta FF}{FF} - \frac{\Delta G}{G}. \quad (\text{II.1.1})$$

Zum Beispiel könnte eine Zelle, die ausschließlich für Bildungszwecke dient, eine Stromdichte von 40 mA/cm^2 , eine Spannung von $0,720 \text{ V}$ und einen Füllfaktor (FF) von $0,82$ aufweisen. Bei einer Bestrahlungsstärke von 100 mW/cm^2 beträgt der Wirkungsgrad $23,616 \%$. Eine Erhöhung der Spannung um 10 mV führt, wenn die anderen Größen konstant gehalten werden, zu einer relativen Leistungssteigerung von etwa $1,39 \%$. Eine Erhöhung des Füllfaktors von $0,82$ auf $0,83$ führt zu einer relativen Steigerung von etwa $1,22 \%$. Dies entspricht einer absoluten Wirkungsgradsteigerung von etwa $0,33$ bzw. $0,29$ Prozentpunkten. Es sollte klar angegeben werden, ob sich der Ausdruck „eine Steigerung um ein Prozent“ auf einen relativen Prozentsatz oder auf Prozentpunkte bezieht.

Diese Berechnung beweist nicht, dass die Interventionen unabhängig voneinander sind. Ein dickeres leitfähiges Oxid kann den Flächenwiderstand verringern und gleichzeitig die optische Absorption erhöhen. Eine stärkere Dotierung kann die Kontaktbarriere verringern, während sie die Auger-Rekombination verstärken kann. Ein dünneres Wafer-Material kann den Materialverbrauch reduzieren, aber die Brechungsrate erhöhen. Die Verlustbilanz sollte diese Wechselwirkungen nicht verbergen; sie sollte die erwarteten positiven Auswirkungen und die möglichen Nachteile jeder vorgeschlagenen Maßnahme zusammen darstellen.

Warum ist der Referenzprozess das Rückgrat der Forschung?

Das Referenzbauelement ist das Ausgangsbauelement, das im Labor über einen bestimmten Zeitraum wiederholt hergestellt werden kann. Es muss nicht das Bauelement mit den besten Leistungswerten sein. Seine kritische Eigenschaft ist die Kenntnis seiner normalen Streuung. Wenn die Ergebnisse bei der Herstellung von Referenzzellen an drei verschiedenen Tagen stark variieren, ist es schwierig, den geringen Einfluss der neuen Dotierstoffkomponente zuverlässig zu isolieren. In diesem Fall besteht die erste Entwicklungsaufgabe nicht darin, ein neues Material zu testen, sondern die Variabilität des bestehenden Prozesses zu verstehen.

Die Versionsnummer der Referenzrezeptur, die Chargennummer des Rohmaterials, der Verlauf der Substratreinigung, der Bediener, der Zustand der Geräteinstandhaltung und die Messdateien werden in einer einzigen Aufzeichnungskette gespeichert. Wenn sich die Referenz ändert, werden die alte und die neue Version am selben Tag oder innerhalb desselben Blocks durch ein Vergleichsexperiment verglichen. So wird verhindert, dass der Fehler, der entstehen würde, wenn man das Ergebnis von vor sechs Monaten mit dem Ergebnis des einzigen erfolgreichen Tests von heute vergleicht, auftritt. Es ist natürlich, dass sich eine Referenz mit der Weiterentwicklung eines Prozesses weiterentwickelt; das Datum und der Grund der Änderung dürfen nicht verloren gehen.

Eine Hypothese in ein Unterscheidungsexperiment umwandeln

„Unser Verfahren reduziert Defekte“ - diese Aussage wird erst dann gestärkt, wenn defektfreie Erklärungen getestet werden. Eine Spannungszunahme kann auf Änderungen der Absorption, der Kontaktspezifität, der Messtemperatur oder der Vorbehandlung unter Licht zurückzuführen sein. Ein Unterscheidungsexperiment wählt eine Bedingung aus, bei der die Hypothesen unterschiedliche Vorhersagen treffen. Beispielsweise wird in demselben Absorberfilm nur der obere Kontakt verändert; während die optische Absorption konstant gehalten wird, werden PL, stabile Leistung und Kontaktwiderstand gleichzeitig überwacht. Anstelle einer einzelnen Messung werden sich ergänzende Messungen verwendet.

Um die Wirkung einer Intervention zu messen, werden nach Möglichkeit Kontroll- und Behandlungsgruppen verwendet, die aus derselben Hauptcharge stammen. Die Substrate werden zufällig über die Fläche verteilt; Pixel auf demselben Substrat werden nicht als unabhängige Produktionswiederholungen gezählt. Verschleierte Dateinamen reduzieren die sorgfältigere Auswahl der Gruppe, von der während der Analyse „gute Ergebnisse“ erwartet werden. Gründe für die Aussonderung von Proben werden vor der Messung definiert; das stille Entfernen von kurzgeschlossenen Bauelementen aus der Tabelle führt zu einer Überschätzung der Akzeptanzrate.

Entwicklungsschritte: In jeder Phase ein weiterer Beweis

Das erste Kriterium ist die Zuverlässigkeit der Messung. Das zweite Kriterium ist, dass der Effekt die Referenzstreuung übersteigt. Das dritte Kriterium ist die Wiederholbarkeit in unabhängigen Chargen. Das vierte Kriterium ist, dass der Effekt anhält, wenn die Fläche vergrößert wird oder der Prozess auf andere Geräte verlagert wird. Das fünfte Kriterium ist die Bewertung unter Berücksichtigung der Beständigkeit und der Produktionskosten. Diese Reihenfolge ist kein universeller Zertifizierungsstandard, sondern der in diesem Buch verwendete Rahmen für das Forschungsmanagement.

Wenn eine der Optionen nicht durchführbar ist, muss dies nicht zwangsläufig zu einem gescheiterten Versuch führen. Beispielsweise liefert ein Passivierungsprozess, der in einem kleinen Bereich funktioniert, in einem größeren Bereich jedoch nicht, wertvolle negative Ergebnisse bezüglich der Homogenität der Beschichtung. Ein Film, der bei niedriger Temperatur stabil ist, sich aber bei Beleuchtung verschlechtert, lenkt die Forschung auf lichtinduzierte Mechanismen. Wenn die Ergebnisdatei nicht nur die erfolgreichen, sondern auch die Gründe für die ausgeschiedenen Optionen enthält, vermeidet man, dass man immer wieder in die gleichen Sackgassen gerät.

Dieses Buch als Arbeitsgrundlage verwenden

Wenn das Messsystem noch nicht eingerichtet ist, beginnt man mit dem zweiten Abschnitt. Das Team, das die bestehende Siliziumtechnologie verbessert, bearbeitet die Abschnitte drei bis sechs. Das Team, das sich mit Dünnschicht- oder Tandemtechnologien beschäftigt, bearbeitet die Abschnitte sieben bis neun und liest anschließend gemeinsam die Abschnitte über Grenzflächen und Zuverlässigkeit. Die Abschnitte über statistische Versuchsplanung und Maßstabsvergrößerung sind für alle Technologien relevant. Der Unternehmensatlas zeigt, welche Organisationen die technischen Prozesse auf Produkt-, Pilot- oder Forschungsebene verfolgen; er stellt keine Rangfolge für den Kauf oder Investitionen dar.

Aufgabe: Erstellen Sie für Ihr eigenes Projekt eine einseitige Zielkarte: Anwendung, Referenz, primäres Ergebnis, Produktionseinheit, Fehlertoleranz, zwei konkurrierende Erklärungen und die nächste Entscheidung. Wenn einer dieser Bereiche unklar ist, klären Sie ihn, bevor Sie neue Proben produzieren.

Entwicklungslabor: Zuerst darauf vertrauen, dass die Messungen korrekt sind

Funktionen der Komponenten auf dem Messtisch

Um die Leistung einer Zelle zu bestimmen, sind eine Lichtquelle, eine Referenz zur Einstellung des Lichts, eine Temperaturregelung, eine elektrische Verbindung und ein Aufzeichnungssystem erforderlich. Der **Solar-Simulator** liefert das Laborlicht. Die **Referenzzelle** korreliert die Lichtintensität mit einer bekannten Reaktion. Der **Probenhalter** hält nicht nur die Zelle an ihrem Platz, sondern beeinflusst auch die Wärme- und Kontaktbedingungen. Die **Quell-Mess-Einheit** misst den Strom bei einer gewählten Spannung oder die Spannung bei einem gewählten Strom. Jedes dieser Elemente ist eine Eingabe für die abschließende Berechnung.

Kurzschluss ist der Zustand, in dem die Klemmenspannung Null ist; **Leerlauf** ist der Zustand, in dem der externe Strom Null ist. Die nützliche maximale Leistung liegt zwischen diesen beiden Zuständen. Wir verwenden das Produkt aus Spannung und Strom, die gleichzeitig gemessen werden. Die Division des Stroms durch die Fläche ergibt die **Stromdichte**. Eine falsche Definition der Fläche kann zu einer falschen Wirkungsgradangabe für die gleiche physikalische Leistung führen.

Wie kann man überprüfen, ob man zum gleichen Ergebnis gelangt?

Wiederholte Messung ist die erneute Messung derselben Probe. Eine **unabhängige Produktionswiederholung** ist die erneute Durchführung der Prozesse an einer neuen Probe. Die erste umfasst die Geräte- und Verbindungsvariabilität, die zweite umfasst zusätzlich die Prozessvariabilität. Die wiederholte Messung derselben Zelle beweist nicht, dass eine neue Rezeptur an verschiedenen Tagen das gleiche Ergebnis liefert.

Synthetisches Beispiel: Drei Messungen derselben Zelle ergeben 20,0%, 20,1% und 20,0%. Diese Werte liegen nahe beieinander. Wenn Zellen aus drei unabhängigen Produktionstagen dagegen 18%, 20% und 22% erreichen, streut der Prozess wesentlich stärker. Bei einem angestrebten Gewinn von nur 0,2 Prozentpunkten sind ein geeignetes Versuchsdesign und mehr unabhängige Informationen nötig, um den Unterschied innerhalb dieser Streuung zu erkennen. Eng beieinanderliegende

Wiederholungsmessungen beseitigen für sich allein auch keinen systematischen Fehler der Lichteinstellung.

Die Messprotokolle sollten die Proben-ID, die Rohdatenkurve, die maskierte Fläche, Licht- und Temperaturwerte, die vorherige Wartezeit sowie die Scanrichtung und -geschwindigkeit enthalten. **Die Vorbehandlung** bezieht sich auf die Einwirkung einer bestimmten Licht-, Spannungs- oder Temperaturfolge auf die Probe vor der Messung. Insbesondere bei Bauelementen mit langsamen ionischen Prozessen beeinflusst diese Vorbehandlung das Ergebnis. Die folgende Berichtsvorlage wandelt das Bildschirmfoto in ein wiederverwendbares Datenset um.

Verständniskontrolle: Die Leistung hat sich geändert, nachdem das Kabel ausgetauscht wurde

Da sich das Material nicht verändert hat, überprüfen Sie zunächst den Kontakt, den Spannungsabfall der Kabel, die Probenstemperatur und die Messgeometrie. Eine Vierleiter-Verbindung kann die Spannung getrennt vom Stromkabel messen und so bestimmte Leitungsverluste eliminieren. Das Verständnis der elektrischen Installation ist wichtiger als die Behauptung einer Materialverbesserung.

Der Wert eines Forschungslabors wird nicht allein durch die Anzahl der vorhandenen Geräte bestimmt. Entscheidend sind die Fähigkeit, dasselbe Material an verschiedenen Tagen auf aussagekräftige Weise zu vergleichen, das Wissen über die Grenzen einer Messung und die Möglichkeit, auf die Rohdaten zurückzugreifen. Bevor Zellen hergestellt werden, muss zunächst das Verhalten der Messkette selbst validiert werden. Lichtquelle, Referenzzelle, Temperatur, Kontaktgeometrie, Flächenmaske, Spannungserfassung und Analysesoftware bilden zusammen ein Messsystem.

Beginnend mit der Probenidentifikation: Nachverfolgbarkeit

Jedes physikalische Substrat muss eine eindeutige Kennung haben. Diese Kennung wird in den Phasen der Filmbildung, des Bauelemente- und des Modulbaus beibehalten. Den einzelnen Pixeln auf demselben Substrat werden separate Substratkennungen zugewiesen. Die Charge des Rohmaterials, der Zeitpunkt der Lösungsherstellung, die Lagerbedingungen und die Schichtreihenfolge werden mit der Substratkennung verknüpft. So kann festgestellt werden, ob die gesamte Gruppe mit geringer Leistung vom selben Beschichtungstag oder aus derselben Glaskiste stammt.

Die Rohdatendateien bleiben unverändert. Die verarbeiteten Ergebnisse werden zusammen mit der Analyseversion und den verwendeten Korrekturfaktoren in neuen Dateien gespeichert. Allein die Angabe von „best“ oder „final“ im Dateinamen ist keine ausreichende Nachverfolgbarkeit. Eine zuverlässige Aufzeichnung enthält die

Proben-ID, den Zeitpunkt, das Gerät, den Messtyp und den Speicherort der Rohdaten. Der vom Geräte-Firmware automatisch generierte Wert wird nicht als unkontrollierbare, endgültige Realität akzeptiert; die Einheitenumrechnung und die Flächenberechnung werden separat überprüft.

Physische Anordnung für die Strom-Spannungs-Messung

Die Quelle-Messvorrichtung legt eine Spannung an die Zelle an und misst den Strom. Bei einer Vier-Leiter-Verbindung werden die stromführenden Leitungen von den spannungserfassenden Leitungen getrennt, wodurch die Einflüsse von Kabel- und Kontaktverlusten auf die Zellspannung reduziert werden. Allerdings korrigiert eine Vier-Leiter-Verbindung nicht automatisch den Streuwiderstand oder eine schlechte Positionierung der Messspitze auf der Zelle. Es sollte dokumentiert werden, ob der Messspitzendruck, der Kontaktpunkt und ein Teil des Metallgitters so eingestellt sind, dass ein Kurzschluss entsteht.

Das Vorzeichen der Stromrichtung wird explizit angegeben. In diesem Buch wird der Strom, den eine beleuchtete Zelle an den externen Stromkreis abgibt, als positiv betrachtet. Der Strom, den das Gerät gemäß der Konvention für elektrische Verbraucher misst, kann negativ sein. Vor der Leistungsberechnung wird diese Konvertierung überprüft. Um eine falsche Verbindung zu korrigieren, ist es keine geeignete Methode, den Absolutwert aller Daten zu nehmen, da dies das Verhalten bei Dunkelheit oder umgekehrter Polarität in einer Weise verändern kann, die dessen Bedeutung aufhebt.

Der Scanbereich sollte den Kurzschluss- und Leerlaufbereich abdecken, jedoch darf keine unnötige Rückpolarität oder ein hoher Vorwärtsstrom an der Probe angelegt werden. Die Spannungsschrittweite, die Wartezeit, die Integrationszeit und die Konformitätsgrenze werden aufgezeichnet. Bei dynamischen Bauelementen stellt ein einzelner schneller Scan nicht die stabile Leistung dar. Die Scanrichtungen und unterschiedliche Geschwindigkeiten sind diagnostische Messungen, um den Einfluss der elektrischen Vorgeschichte aufzudecken.

Licht, Spektrum und Temperatur sind keine austauschbaren Größen

Die Klasse eines Simulators wird anhand der spektralen Verteilung, der Gleichmäßigkeit der Bestrahlung in der Messebene und der Stabilität über die Zeit bewertet. Die IEC 60904-9:2020 klassifiziert diese Eigenschaften separat; eine gute Klassifizierung bedeutet nicht, dass die spektrale Inkompatibilität jeder einzelnen Zelle Null ist. Wenn die spektrale Reaktion des neuen Absorbers von der Referenzzelle abweicht, ist eine Korrektur erforderlich. [D20]

Der Temperatursensor sollte die Betriebstemperatur der Probe widerspiegeln. Die Temperatur der Platte muss nicht unbedingt mit der Temperatur der Zelloberfläche unter Lichteinwirkung übereinstimmen. Dickes Glas, schlechter thermischer Kontakt oder eine kurze Blitzmessung können diese Beziehung beeinflussen. Durch die Messung desselben Referenzbauelements nach unterschiedlichen Lichtexpositionen kann der Erwärmungseffekt beobachtet werden. Da die Auswirkungen der Erwärmung und der ionischen Umordnung in Perowskiten miteinander verbunden sein können, ist eine Zeitregistrierung erforderlich.

Die Öffnung der Maske wird mit einem optischen Mikroskop oder durch eine geeignete dimensionsbezogene Messung verifiziert. Die aktive Fläche, die Öffnungsfläche und die Gesamtfläche des Bauelements sind nicht dasselbe Konzept. Eine kleine Fläche führt zu einer künstlichen Erhöhung der Stromdichte und des Wirkungsgrads. Die Lichtstreuung am Rand der Maske, die Sammlung von Ladungsträgern aus benachbarten, nicht maskierten Bereichen und der Effekt einer reflektierenden Unterlage werden berücksichtigt. In einem Laborvergleich können die Ergebnisse mit und ohne Maske zusammen dargestellt werden; es muss klar sein, zu welchem Flächenbegriff welches Ergebnis gehört.

Stabile Leistung und gegenseitige Kontrolle von EQE

Die Verfolgung des Maximum-Power-Points misst die zeitabhängige Leistungsabgabe, indem die Spannung oder die Last um den Punkt maximaler Leistung herum geregelt wird. Es kann nützlich sein, die aus einer anfänglichen Abtastung erhaltene MPP-Spannung konstant zu halten, dies entspricht jedoch nicht der tatsächlichen Verfolgung, wenn sich der MPP des Bauelements im Laufe der Zeit ändert. Die Schwingungen des Steueralgorithmus müssen von den physikalischen Schwankungen des Bauelements getrennt werden. Die rohen Spannungs-, Strom- und Zeitreihendaten werden gespeichert; es wird jedoch nur die geglättete Leistungskurve dargestellt.

Die externe Quanteneffizienz (EQE) gibt die Umwandlung von einfallenden Photonen in Ladung in der externen Schaltung in Abhängigkeit von der Wellenlänge an. Wenn die gemessene EQE mit einem geeigneten Referenzspektrum multipliziert und integriert wird, kann der erwartete Kurzschlussstrom berechnet werden. Deutliche Abweichungen bei der Strom-Spannungs-Messung werden hinsichtlich spektraler Korrektur, Fläche, Lichtvorspannung, Nichtlinearität des Bauelements oder Referenzkalibrierung untersucht. In Tandemzellen erfordern die einzelnen Spektralantworten der Unterzellen und eine geeignete Lichtvorspannung eine besondere Betrachtung; IEC 60904-1-1 behandelt die Strom-Spannungs-Messung von Mehrfachübergangs-Bauelementen und betont die Bedeutung der erforderlichen spektralen Antwortdaten. [D19]

$$J_{\text{sc}}^{\text{EQE}} = q \int \Phi(\lambda) \text{EQE}(\lambda) d\lambda. \quad (\text{II.2.1})$$

Hier wird der Photonenfluss pro Wellenlänge angegeben. Wenn die Daten pro Nanometer angegeben sind, sollte auch die Integrationsschrittweite in Nanometern erfolgen; das unkontrollierte Mischen der Wellenlänge in Metern mit der spektralen Dichte pro Nanometer führt zu einem erheblichen Fehler in der Einheit. Das im ersten Buch angegebene Beispiel für das spektrale Integral ist daher die tägliche Kontrollberechnung des Messlabors.

Unsicherheit in eine Zahl umwandeln

Für unabhängige, kleine Unsicherheiten können die relativen Varianzen von Produkten und Quotienten addiert werden. Bei realen Messungen, bei denen eine Korrelation vorliegt, werden auch die Kovarianzterme hinzugefügt. Die folgende Gleichung ist besonders anschaulich, wenn anstelle der Stromdichte direkt Leistung und gemessene Fläche verwendet werden:

$$\eta = \frac{P_{\text{max}}}{GA}, \quad u_r^2(\eta) \approx u_r^2(P_{\text{max}}) + u_r^2(G) + u_r^2(A). \quad (\text{II.2.2})$$

Im Lehrbeispiel seien die relativen Standardunsicherheiten 0,6 % für die Leistung, 1,0 % für die Bestrahlungsstärke und 0,5 % für die Fläche. Unter der Annahme unabhängiger Beiträge beträgt die kombinierte relative Standardunsicherheit etwa 1,27 %. Bei einem Wirkungsgrad von 24 % entspricht dies etwa 0,30 Prozentpunkten. Bei einer Erweiterung um ungefähr den Faktor zwei wird das Intervall noch größer; der Erweiterungsfaktor und die Interpretation der Überdeckung müssen jedoch gesondert angegeben werden. Bei einem gepaarten Vergleich im selben Aufbau können sich gemeinsame systematische Fehler teilweise aufheben. Die Unsicherheit des absoluten Wirkungsgrads ist daher nicht dieselbe wie die Unsicherheit des Prozessunterschieds.

Eine unabhängige Wiederholung unterscheidet sich von einer Wiederholungsmessung

Das zehnmahlige Auslesen derselben Zelle liefert Informationen über die kurzfristige Reproduzierbarkeit des Geräts. Die Herstellung von zehn Zellen auf demselben Substrat zeigt die Verteilung innerhalb des Substrats. Die Herstellung von drei verschiedenen Lösungen an verschiedenen Tagen und die Durchführung von drei verschiedenen Beschichtungen testet die Prozessreproduzierbarkeit. Das Kombinieren dieser Ebenen und das Erhöhen der Stichprobengröße führt zu einer Unterschätzung der Konfidenzintervalle. Der NIST-Messprozessrahmen unterstützt die separate Bewertung von Reproduzierbarkeit, Reproduzierbarkeit und zeitlicher Stabilität. [D16]

Kontrolle	Anwendung	Problem, das damit erkannt werden kann
Tägliches Referenzbauelement.	Messung zu Beginn und am Ende des Tages mit derselben Anordnung.	Licht- oder Geräte-Drift.
Wiederholtes Lösen und Wiederherstellen des Kontakts	Die gleiche Zelle erneut verbinden.	Empfindlichkeit gegenüber Messspitzen und Halterungen
Zweiter Bediener	Einige anonymisierte Proben messen.	Operatoreffekt
Flächenvalidierung	Apertur mit einer unabhängigen geometrischen Messmethode vermessen	Systematische Abweichung des Wirkungsgrads
Stromberechnung mit dem EQE.	Spektrales Integral mit JV vergleichen.	Spektral- oder Flächenfehlانpassung
Unabhängiges Labor	Repräsentative und Referenzmuster zusammen einsenden.	Laboratoriumsbedingte Verzerrung.

Mindestbericht über die Messungen

Der Bericht muss die Probenstruktur, die Flächenangabe, die Bestrahlung, das Spektrum, die Temperatur, die Scanrichtung und -geschwindigkeit, die Vorbehandlung, die Methode zur Bestimmung der stabilen Leistung, das Datum der Referenzkalibrierung und die Unsicherheit enthalten. Fehlerhafte Proben, nicht messbare Bauelemente und die Gründe für die Aussonderung werden separat aufgeführt. Der Median oder der Mittelwert der Gruppe, die Verteilung und das beste Bauelement werden zusammen dargestellt. Diese Struktur ist notwendig, um echte Verbesserungen von Anfang an erkennen zu können und nicht, um die Forschung zu verlangsamen.

Übungsaufgabe: Entwerfen Sie ein kleines Experiment, bei dem Sie die Referenzzelle im Labor über zwei Tage, mit zwei Bedienpersonen und drei Neukalibrierungen messen. Bereiten Sie im Voraus eine Tabelle vor, die den Probenwechsel vom Messwechsel trennt. Die Ausgabe sollte nicht nur eine einzelne Standardabweichung sein, sondern eine Aufzeichnung, die zeigt, welcher Wert von welcher Operation stammt.

Siliziumweg: Vom Rohmaterial zum gereinigten und strukturierten Wafer

Welche Umwandlungsprozesse sind erforderlich, um aus Sand Wafer herzustellen?

In der Natur kommt Silizium meist in gebundener Form mit anderen Elementen vor. **Siliziumdioxid**, SiO_2 , ist eine Verbindung aus Silizium und Sauerstoff; es ist nicht dasselbe Material wie der kristalline Silizium-Absorber in einer Solarzelle. Die Herstellung von elementarem Silizium ist ein chemischer Prozess, und das Erreichen einer elektronischen Qualität stellt ein separates Reinigungsproblem dar. Selbst geringe Mengen bestimmter Metalle können den Verlust von Ladungsträgern beschleunigen, daher beschreibt der Ausdruck „sehr rein“ nicht allein die Auswirkungen von Defekten.

Polysilizium ist ein gereinigtes Silizium-Rohmaterial, das aus vielen Kristallkörnern besteht. Beim **Czochralski-Verfahren** wird ein Keimkristall in geschmolzenes Silizium getaucht und durch kontrolliertes Ziehen ein großer Kristall gezüchtet. Der **Ingot** ist der resultierende große Kristallkörper. Ein **Wafer** ist eine dünne Scheibe, die aus diesem Körper geschnitten wird. Während des Kristallwachstums können Verunreinigungen und Dotierstoffverteilungen nicht überall im Ingot gleich sein; daher werden Positions- und Chargeninformationen gespeichert. [D08]

Schneiden, Reinigen und Texturieren sind separate Prozesse

Auf der Schnittfläche können beschädigte Schichten und mechanische Spannungen entstehen. **Ätzen** ist das kontrollierte Entfernen von Material von der Oberfläche. **Reinigen** zielt darauf ab, Verunreinigungen oder chemische Rückstände zu entfernen, die den nachfolgenden Verarbeitungsprozess beeinträchtigen könnten. **Texturieren** erzeugt eine Geometrie, die die Reflexion von Licht von der Oberfläche reduziert. Obwohl diese drei Prozesse möglicherweise in derselben Flüssigkeit durchgeführt werden, sind ihre Ziele unterschiedlich; die Ergebnisse werden unterschiedlich gemessen.

Die verschiedenen Kristallorientierungen lösen sich unter bestimmten Ätzbedingungen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit auf. Diese **Anisotropie** ermöglicht die Bildung pyramidenförmiger Oberflächen. Eine geringere Reflexion kann vorteilhaft sein, aber eine größere Oberfläche kann auch zu mehr defekten Bindungen und einer

schwierigeren Beschichtung führen. Der optische Gewinn sollte zusammen mit der abschließenden Passivierung bewertet werden.

Synthetische Massenberechnung: Betrachten wir 1 cm^2 Silizium mit einer Dicke von $150 \text{ }\mu\text{m}$. Die Dicke beträgt $0,015 \text{ cm}$, das Volumen $0,015 \text{ cm}^3$. Wenn wir eine Dichte von etwa $2,33 \text{ g/cm}^3$ annehmen, ergibt sich eine Masse von etwa $0,035 \text{ g}$. Die Verringerung der Dicke reduziert auch die Masse des Materials in der idealen Geometrie (20 % bzw. 20 %). Ohne Kenntnis der Schnittverluste, der Bruchrate und der Akzeptanzrate kann nicht gesagt werden, dass die Materialmenge pro Zelle in gleichem Maße reduziert wird.

Verständniskontrolle: Reicht es aus, die Oberfläche mit der geringsten Reflexion auszuwählen?

Nach der Texturierung sollten Reflexion, Oberflächenreinheit, die Lebensdauer nach der Passivierung und die Bruchrate zusammen bewertet werden. Wenn die Textur zwar optisch gut ist, aber nicht für die nachfolgende dünne Schicht geeignet ist, ist der gesamte Prozess nicht erfolgreich.

Der Prozessablauf zur Herstellung einer Siliziumzelle.



Abbildung 01. Prozesskette vom Kristall zur Zellvorstufe. Drahtschneiden, Oberflächenvorbereitung, Diffusion und Zwischenkontrolle steuern verschiedene Qualitätsvariablen; das Verfahren ist nicht die spezifische Rezeptur einer bestimmten Fabrik. [D01] [D06] [D07] [D08] Mit einem Bildgenerierungswerkzeug erstellte konzeptionelle Illustration; keine Messaufnahme.

Bei der Entwicklung von Siliziumzellen ist die auffälligste Neuerung oft die Kontaktarchitektur; jedoch wird die Leistung, die die Zelle erreichen kann, auch durch das Ausgangsmaterial begrenzt. Die Verteilung des spezifischen Widerstands, die Lebensdauer, die Verunreinigung durch Sauerstoff und Metalle, die Waferdicke, die Krümmung und die Oberflächenbeschädigung beeinflussen die nachfolgenden Prozesse. Eine gute Beschichtung kann nicht alle Probleme eines schlecht ausgewählten Ausgangsmaterials beheben. Dieses Kapitel behandelt den Anfang der Produktionskette und betrachtet ihn im Hinblick auf die Kontrolle der Variablen für nachfolgende Experimente.

Reinigung und Kristallzüchtung sind unterschiedliche Problembereiche

Die Umwandlung von metallurgischem Silizium in hochreines polykristallines Silizium umfasst chemische Reinigungs- und Abscheidungsschritte. Siemens-Verfahren mit Abscheidung auf Stäben und Wirbelschichtverfahren verwenden unterschiedliche Reaktoraufbauten, Energieverbräuche und führen zu unterschiedlichen Produktformen. Die nachfolgende Kristallwachstumsphase erzeugt aus diesem Rohmaterial kontrolliert Kristalle mit definierter Dotierung und Geometrie. Das Zusammenfassen der beiden Phasen in einer einzigen „Siliziumproduktion“-Kategorie verschleiert, welcher Schritt für welche Art von Verunreinigung oder Kostenquelle verantwortlich ist. [\[D01\]](#)

Es ist nicht erforderlich, dass ein Universitätslabor die gesamte Reinigungs- und Verarbeitungskette einrichtet, um die meisten Fragen zur Zellentwicklung zu beantworten. Bei der Arbeit mit gekauften Wafern werden die Messspezifikationen, die Loskonsistenz und die Abnahmekriterien des Lieferanten überprüft. Die vom Hersteller angegebene geringe Metallverunreinigung garantiert nicht allein, dass die Lebensdauer der Zelle gleich bleibt; auch der Ofen, die Ladungsträger und die Nassverfahren können Verunreinigungen hinzufügen. Das Ausgangsmaterial und die prozessbedingten Verluste müssen separat überwacht werden.

Czochralski-Wachstum und Schwankungen innerhalb einer Charge

Beim Czochralski-Verfahren wird ein Keimkristall aus geschmolzenem Silizium gezogen; das Temperaturfeld, die Ziehgeschwindigkeit und die Drehbedingungen beeinflussen das Wachstum des Kristalls. Eine ungleichmäßige Verteilung von Dotieratomen zwischen der festen und der flüssigen Phase kann zu einer Änderung des spezifischen Widerstands entlang des Ingots führen. Die Wechselwirkung mit dem Quarz-Tiegel kann den Sauerstoffgehalt beeinflussen. Wenn daher Wafer, die vom Anfang und Ende desselben Ingots entnommen wurden, ungleichmäßig auf die Versuchsgruppen verteilt werden, kann der vermeintliche Prozesseffekt tatsächlich auf das Ausgangsmaterial zurückzuführen sein. Die UNSW-Produktionsquelle erläutert in diesem Zusammenhang die Dotierstoffsegregation und den wiederholten Cz-Ansatz.

[D08]

Für dieses Problem ist eine einfache Kontrollmaßnahme das Blockieren der Wafer nach Los und Ausgangsmaterial. Eine Kontrollgruppe wird nicht aus derselben Box wie die Verarbeitungsgruppe entnommen. Wenn möglich, werden benachbarte Wafer verschiedenen Versuchsgruppen zugeordnet. Am Eingang werden Karten mit den Messwerten für spezifischen Widerstand, Dicke und Lebensdauer gespeichert. Auch wenn die Gruppenmittelwerte ähnlich sind, wird nicht nur eine Einzelpunktmessung durchgeführt, da in den Randbereichen systematische Unterschiede auftreten können.

Dünnung, Schnittschäden und mechanische Akzeptanz

Die Verringerung der Wafer-Dicke reduziert den Siliziumverbrauch pro Flächeneinheit. Im Gegenzug wird die Anfälligkeit für Brüche in den Phasen des Transports, der Handhabung, des Ofenladens und der Laminierung wichtiger. Oberflächenschäden, die beim Schneiden entstehen, und Mikrorisse an den Kanten können bis zur Endzelle unbemerkt bleiben. Das Erfolgskriterium eines Projekts zur Dickenreduzierung ist nicht nur die Einsparung pro Gramm, sondern auch das akzeptable Materialverhältnis pro Watt und die Gesamtakzeptanzrate der Produktionslinie.

Betrachten wir als Beispiel zwei Prozesse, bei denen die Dicke um 10 % reduziert wird. Wenn sich im ersten Prozess die Bruchrate nicht ändert, führt die Materialeinsparung direkt zu einem Vorteil. Im zweiten Fall, wenn die Gesamtausbeute an einwandfreien Produkten von 98 % auf 87 % sinkt, kann die anfängliche Verwendung von weniger Material möglicherweise keinen Vorteil pro verkaufbarem Produkt bringen. Dieses Beispiel ist nicht ausreichend für eine vollständige Kostenberechnung; zusätzlich müssen Schnittverluste, Energie und Nachbearbeitung berücksichtigt werden. Dennoch

zeigt es, warum eine Optimierung anhand eines einzelnen Parameters irreführend sein kann.

Reinigung: Auf welchen nachfolgenden Prozess wird die Oberfläche vorbereitet?

Die Reinigung dient nicht nur dazu, sichtbaren Schmutz zu entfernen. Organische Rückstände, Metallionen, Partikel und Oberflächenoxid stellen unterschiedliche Probleme dar. Wenn der nächste Prozess eine Oxidation, eine Beschichtung mit amorphem Silizium oder die Bildung einer selbstorganisierenden molekularen Schicht ist, ändert sich das Ziel der Oberflächenbeschaffenheit. Anstelle der Formulierung „gründlicher gereinigt“ wird angegeben, welcher Rückstand bis zu welchem Nachweisgrenzwert reduziert wurde und welche chemische Endbeschaffenheit die Oberfläche aufweist.

Die chemische Reinigung und Ätzung wird unter Einhaltung des genehmigten Verfahrens der Anlage, mit angemessener Belüftung, geeigneten Materialien und einer ordnungsgemäßen Abfallentsorgung durchgeführt. Die hier beschriebenen Prozesse ersetzen nicht die Schulung des Personals in Bezug auf Geräte und chemische Sicherheit. Ein kritischer Punkt für die Forschung ist, dass die Qualität des Spülens und die Zeitspanne von der Reinigung bis zur Beschichtung ebenfalls Teil des Verfahrens sind. Wenn die Oberfläche mehrere Stunden in der Luft verbleibt, kann sie sich von ihrem Zustand nach dem Verlassen des Ofens oder des Bades unterscheiden.

Texturierung und optisch-elektrischer Kompromiss

Die Geschwindigkeit der alkalischen Ätzung, die von der Kristallorientierung abhängt, wird verwendet, um eine pyramidale Oberflächenstruktur auf Einkristall-Silizium zu erzeugen. Die geneigten Oberflächen beeinflussen die erneute Reflexion des Lichts und dessen Weg innerhalb des Materials. Da sich jedoch die tatsächliche Oberfläche verändert, ändert sich auch der Bedarf an Passivierung. Die UNSW-Quelle zeigt den Zusammenhang zwischen der Kristallorientierung der alkalischen Struktur und den Benetzungseigenschaften sowie den Badbedingungen. Der Vorschlag dieses Buches ist, die Texturoptimierung nicht nur auf die Reflexion bei einer einzelnen Wellenlänge zu beschränken. [\[D06\]](#)

Die spektrale Reflexion sollte mit dem entsprechenden Photonenfluss gewichtet werden. Außerdem sollten die Lebensdauer vor und nach der Texturierung sowie nach der Passivierung verglichen werden. Eine Oberfläche mit sehr geringer Reflexion kann aufgrund der hohen Oberflächenrekombination zu einem geringeren Gesamtwirkungsgrad führen. Bei der für Tandemzellen vorgesehenen Silizium-Unterzelle können höhere Pyramiden die vollständige Abdeckung der oberen

Schicht erschweren. Daher wird die für eine einzelne Zelle geeignete Texturierung für die Tandemintegration neu konzipiert.

Intervention	Primäre Beobachtung	Gleichzeitig zu überwachender Zielkonflikt
Ätzdauer oder Zustand des Ätzbads	Spektraler Reflexionsgrad, Pyramidenverteilung	Massenverlust, Oberflächenlebensdauer
Dünnere Wafer	Dicke und Materialverbrauch	Verwölbung, Handhabungsbruch, rückseitiger optischer Verlust
Reinigungsreihenfolge	Oberflächenkontamination und Benetzung	Oberflächenrauheit, erneute Oxidation.
Auswahl der Charge	Spezifischer Widerstand und Lebensdauer-Profil	Kosten, Kontinuität der Versorgung
Verkleinerung der Textur	Deckschichtabdeckung	Lichteinfang und Grenzflächenfläche

Die Bedeutung der Diffusion bei der Prozessentwicklung

Bei der Dotierstoffdiffusion können die Dotierzufuhr und die Dotierstoffkonzentration im Material getrennt voneinander gesteuert werden. Für das Endbauelement ist nicht nur die Gesamtmenge des Dotierstoffs von Bedeutung, sondern auch das Tiefenprofil, die elektrische Aktivierung und die Konzentration in der Nähe der Oberfläche. Bei der einfachen Annahme eines konstanten Diffusionskoeffizienten lautet die Fick-Gleichung wie folgt:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad D = D_0 \exp \left(-\frac{E_a}{k_B T} \right). \quad (\text{II.3.1})$$

Die rechte Seite hat ein positives Vorzeichen; die zweite Ableitung mit negativem Vorzeichen verhält sich entgegengesetzt zur physikalischen Diffusion. Wenn sich die Gasquelle, die Randbedingungen und das Temperaturzeitprofil ändern, sind Abweichungen von dieser einfachen Lösung zu erwarten. Es wird nicht davon ausgegangen, dass die Verdopplung der Zeit die Dotierungstiefe verdoppelt; die einfache Diffusionsskala ist mit der Quadratwurzel der Zeit verbunden. Bei der industriellen Röhrendiffusion sind der Waferabstand, die Beladungsmenge und die Position in Bezug auf den Gasstrom ebenfalls experimentelle Faktoren. [D07]

Eine Karte des Flächenwiderstands ist ein Indikator für einen schnellen Prozess; es können unterschiedliche Tiefenprofile mit dem gleichen Flächenwiderstand vorliegen. Daher werden bei ausgewählten Proben mit Messungen, die Tiefeninformationen liefern, wie z. B. ECV oder SIMS, Quervergleiche durchgeführt. SIMS misst die

Gesamtmenge der Elemente, während elektrische Methoden das Profil der aktiven Ladungsträger widerspiegeln; es ist falsch, die beiden direkt als identisch zu betrachten.

Beispiel für eine Entwicklungsstudie: Ist eine geringe Reflexion ausreichend?

Eine einzelne Wafer-Charge wird zufällig auf drei verschiedene Oberflächenbedingungen verteilt. Für jede Bedingung werden die Eingangs- und Ausgangsmassen, das Reflexionsspektrum und das Oberflächenbild aufgezeichnet. Anschließend wird bei allen die gleiche Passivierung durchgeführt und die Lebensdauer gemessen. Wenn die Lebensdauer der Gruppe mit der geringsten Reflexion deutlich niedriger ist, wird der elektrische Preis für eine verbesserte Lichtabsorption deutlich. Die endgültige Entscheidung wird nach Abschluss des gleichen Zellprozesses anhand von Strom, Spannung, Füllfaktor und Akzeptanzrate getroffen.

Die Stärke dieser Studie liegt in der Korrelation der Zwischenmessungen mit der Endleistung. Die Schwäche besteht darin, dass die Wechselwirkung zwischen Beschichtung und Struktur unklar bleibt, wenn nur eine einzelne Beschichtung durchgeführt wird. In der zweiten Phase wird der Prozess an einem anderen Tag wiederholt, und die Wechselwirkung zwischen Struktur und Passivierung wird besonders untersucht. Auf diese Weise geht die Forschung von der Bewertung eines Gerätebildes zur Definition eines reproduzierbaren Prozessfensters über.

TOPCon-Entwicklung: Ziel ist es, eine gute Passivierung mit einer guten Leitfähigkeit zu kombinieren

Warum befindet sich eine Oxidschicht in TOPCon-Solarzellen?

Wenn ein Metall direkt mit defektem Silizium in Kontakt tritt, können Ladungsträger leicht an der Oberfläche verloren gehen. Eine gut passivierende Isolationsschicht kann hingegen den Abfluss von Strom erschweren. **TOPCon** ist ein passivierter Kontaktansatz, der versucht, diese Spannung über eine sehr dünne Oxidschicht und eine stark dotierte Siliziumschicht zu lösen. Die Oxidschicht hilft, Defekte an der Grenzfläche zu reduzieren; die darüber liegende dotierte Schicht sorgt für Selektivität und elektrische Verbindung. Es sollte angegeben werden, auf welcher Oberfläche und für welchen Ladungsträger sie verwendet wird. [D04] [D05]

Tunneling ist ein Quantenübergang durch eine sehr dünne Energiebarriere. Neben dem Tunneling am tatsächlichen Kontakt können auch andere Leitungswege eine Rolle spielen, wie z. B. sehr kleine lokale Öffnungen. Daher kann nicht die Schlussfolgerung gezogen werden: „Oxidschicht 1,5 nm, daher ist der Kontakt definitiv gut“. Die **Oxidqualität** wird zusammen mit der Dickeverteilung, dem chemischen Zustand und den **Defekten** bewertet. **Selektivität** bedeutet die Förderung des Durchgangs der gewünschten Ladungsträger und die Unterdrückung des Verlusts der entgegengesetzten Ladungsträger.

Was leisten die abgekürzten Abscheidungsverfahren?

CVD ist eine Familie von Abscheidungsverfahren, bei denen gasförmige Vorläufer durch chemische Reaktionen auf einer Oberfläche eine feste Schicht bilden. **LPCVD** ist CVD bei niedrigem Druck; **PECVD** ist CVD, bei dem ein Plasma die Reaktionen aktiviert. **Plasma** ist eine angeregte Gasumgebung, die Elektronen und Ionen enthält. **Tempern** ist ein Wärmebehandlungsprozess, der die Struktur der Schicht und die Dotieraktivierung verändert. Die Abscheidung und die endgültige elektronische Qualität sind nicht dasselbe; die Schicht kann nach der Verarbeitung neue Eigenschaften entwickeln oder beschädigt werden.

Hydrierung zielt darauf ab, bestimmte aktive Bindungsdefekte durch Hydrierung zu passivieren. Nachfolgende Temperaturbehandlungen und Metallisierungen können diesen Effekt jedoch wieder aufheben. **Metallisierung** ist der Prozess der Erzeugung eines Metallkontakts, der den elektrischen Strom sammelt. Um zu beurteilen, ob die fertige Zelle gut funktioniert, müssen wir nicht nur die Passivierung vor der

Metallisierung, sondern auch den resultierenden Kontaktwiderstand und die Leistung messen.

Synthetischer Vergleich: Die Verbesserung der Passivierung erhöht die Spannung (1 %), während der Ladungstransportverlust den Füllfaktor (FF) verringert (2 %), wobei der Strom unverändert bleibt. Das Leistungsverhältnis beträgt $1,01 \times 0,98 = 0,9898$; es gibt eine ungefähre Abnahme von 1,02 %. Dies bedeutet nicht, dass ein gutes Passivierungsergebnis wertlos ist; es zeigt, dass die Ladungstransportprobleme nicht gleichzeitig gelöst werden. Der folgende Beispielbaum zeigt, wie diese beiden Effekte getrennt voneinander kontrolliert werden können.

Verständniskontrolle: In welcher Phase sollte gemessen werden?

Messen Sie nach der Oxid- und dotierten Schicht die Passivierung, nach der Metallisierung den Kontakt und die Leistung der vollständigen Zelle. Wenn in der ersten Phase eine Verbesserung und am Ende ein Verlust beobachtet wird, testen Sie die nachträglich angewendete Wärmebehandlung, die chemische Wechselwirkung und den Metallkontakt separat. Das Messen nur der letzten Zelle kann jedoch verbergen, in welcher Phase der Verlust aufgetreten ist.

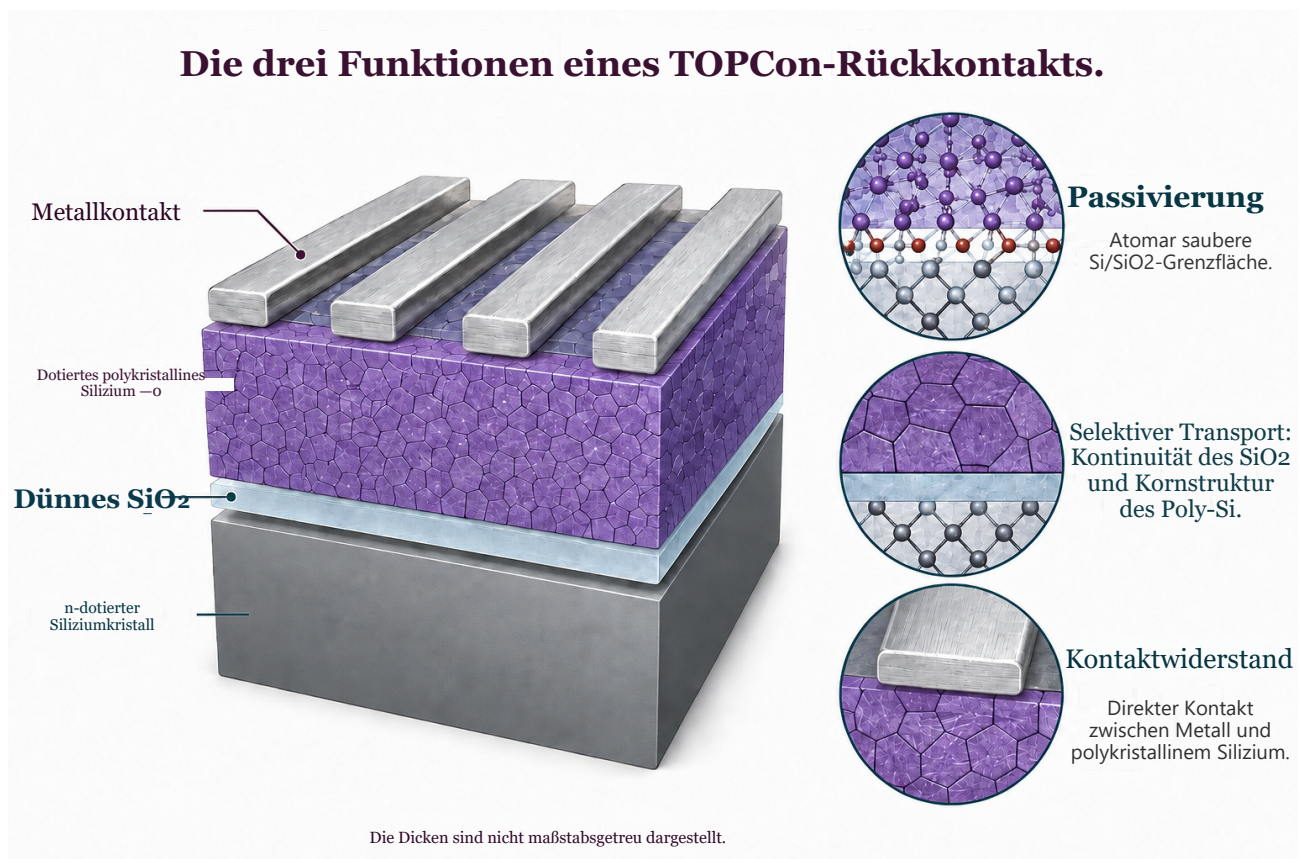


Abbildung 02. Schematische Vergrößerung eines TOPCon-Rückkontakts. Die dünne Oxidschicht, das dotierte polykristalline Silizium und das Metall auf dem kristallinen Silizium wirken zusammen; eine gute Passivierung allein garantiert jedoch keinen niedrigen Kontaktwiderstand. [D04] [D31] Mit einem Bildgenerierungswerkzeug erstellte konzeptionelle Illustration; keine Messaufnahme.

Der Begriff TOPCon beschreibt einen passivierten Kontaktansatz, bei dem eine mit einer sehr dünnen Schicht aus Siliziumoxid dotierte Siliziumschicht verwendet wird. Die Forschungsfrage ist nicht nur, wie dünn das Oxid ist. Die Integrität des Oxids, das Dotierungsprofil, die Kristallisation, der Wasserstoffgehalt, der Metallkontakt und die optische Absorption sind zusammen von Bedeutung. Ein guter TOPCon-Kontakt sollte die Rekombination von Minderheitsladungsträgern unterdrücken und gleichzeitig die Mehrheitsladungsträger mit geringen Verlusten leiten. Die gleichzeitige Erreichung dieser beiden Ziele steht im Mittelpunkt des Ansatzes. [D05]

Die Schichtfolge als Funktionsdiagramm interpretieren

In einem typischen n-Typ-Zellbeispiel befindet sich auf der Vorderseite eine mit Bor dotierte Emitterschicht, eine Oberflächenpassivierung und eine Antireflexbeschichtung; auf der Rückseite befindet sich ein oxid/poly-Si-passivierter Kontakt. Dies bedeutet nicht, dass alle TOPCon-Produkte die gleiche Rezeptur haben. Die Position des Emitters, die Dotierungsmethode, die Methode zur Aufbringung der poly-Si-Schicht und die Metallisierung können variieren. Beim Betrachten eines Zellquerschnitts sollten Sie sich für jede Schicht folgende Fragen stellen: Welche Art von Ladungsträger wird ausgewählt? Welche Grenzfläche wird passiviert? In welcher Richtung werden die Ladungsträger transportiert? Wie viel des Lichts wird in dieser Schicht absorbiert, ohne einen Beitrag zu leisten?

Das von Mack und seinen Kollegen veröffentlichte Fraunhofer ISE-Prozessbeispiel verwendet eine thermische Oxidschicht und eine In-situ-phosphordotierte LPCVD-Siliziumschicht, eine Passivierung der Vorderseite und gedruckte Metallkontakte. In der Studie werden Prozessvergleiche mit etwa 80 nm Poly-Si durchgeführt; dieser Wert ist jedoch kein universelles Optimum, das auf alle Produktionsstätten übertragen werden kann. Der lehrreiche Aspekt der Studie besteht darin, dass die Passivierung und der abschließende Metallkontakt an getrennten Proben und in fertigen Zellen bewertet werden. [D04]

Die Oxidschichtdicke allein ist keine ausreichende Kennzeichnung

Die Dickenmessung liefert einen Durchschnittswert; das elektrische Verhalten kann durch lokale, dünne Bereiche oder Diskontinuitäten beeinflusst werden. Ein hochohmiger Oxidfilm begrenzt den Ladungsträgertransport. Eine stark degradierte Grenzfläche kann den Rekombinationsverlust des Metalls oder der dotierten Schicht erhöhen. Die Oberflächenvorbereitung, die Methode der Oxidbildung und der nachfolgende thermische Schritt sollten gemeinsam betrachtet werden. Ein schönes TEM-Bild einer Oxidprobe beweist nicht das Stromtransportverhalten.

In den ersten Experimenten können die Bedingungen der Oxidbildung und das anschließende Tempern in einem faktoriellen Design untersucht werden.

Symmetrische Lebensdauerproben zeigen die Rekombination, Kontaktwiderstandstrukturen zeigen den Ladungstransportverlust, und vollständige Zellen zeigen das Ergebnis beider Effekte zusammen. Bei der Erstellung einer Leistungskurve in Abhängigkeit von der Oxiddicke wird geprüft, ob jeder Punkt das gleiche Dotierungsprofil und die gleiche thermische Vorgeschichte aufweist. Andernfalls mag die horizontale Achse der Kurve scheinbar nur eine Variable darstellen, aber physikalisch gesehen haben sich mehrere Variablen geändert.

Auswahl der LPCVD-, PECVD- und Dotierungsverfahren

LPCVD steht für chemische Gasphasenabscheidung bei niedrigem Druck, während PECVD für chemische Gasphasenabscheidung mit Plasmaunterstützung steht. Bei der In-situ-Dotierung wird die Dotierquelle während des Beschichtungsprozesses eingebracht. Bei der Ex-situ-Dotierung wird zunächst eine Siliziumschicht vorbereitet, anschließend wird die Dotierung aufgebracht und aktiviert. Die Auswahl erfolgt unter Berücksichtigung der Abscheidungsrate, der einseitigen oder zweiseitigen Beschichtung, der Vermeidung von ungewollter Randbeschichtung, des Reinigungsbedarfs, des thermischen Budgets und der Kapazität pro Anlage. Der Name der Methode allein garantiert keine niedrigen Kosten oder einen hohen Wirkungsgrad. In veröffentlichten Experimenten wurde gezeigt, dass bei einer mit PECVD hergestellten TOPCon-Struktur der letzte Ausglühschritt die Passivierung beeinträchtigt, während ein nachfolgender Hydrierungsprozess dies teilweise wiederherstellt. Diese Beobachtung schwächt die Annahme, dass „nach dem Ausglühen der Prozess abgeschlossen ist und das Material stabil ist“; die Leistung des Endprodukts hängt von der gesamten thermischen Behandlung ab. [D31] Daher enthalten die Entwicklungsdokumentationen nicht nur die höchste Temperatur, sondern auch die Heiz- und Kühlhistorie, die Wartezeit und die Zeit zwischen den einzelnen Prozessschritten.

Warum stellt die Metallisierung eine separate Forschungsebene dar?

Die Metallpaste kann während des Brennprozesses die isolierende Beschichtung durchdringen und einen elektrischen Kontakt herstellen. Wenn der Kontakt unzureichend ist, bleibt der Serienwiderstand hoch. Wenn der Kontakt zu weit fortschreitet, kann die Unterschicht oder der Übergang beschädigt werden. Der Austausch der Paste erfordert auch eine Neubewertung des Brennprofils. Es wird nicht davon ausgegangen, dass Vorder- und Rückseite das gleiche Metallisierungsverhalten aufweisen. Eine hohe, vor der Metallisierung gemessene Spannung garantiert nicht, dass nach der Metallisierung die gleiche Spannung erreicht wird.

$$p_{\Omega} \approx J_{\text{mpp}}^2 r_s. \quad (\text{II.4.1})$$

Für den mit der Fläche normalisierten Serienwiderstand stellt diese angenäherte Verlustdichte die Priorität für die Weiterentwicklung dar. In dem Beispiel wird bei einem MPP-Strom von $0,038 \text{ A/cm}^2$ und einer Widerstandsreduktion von $0,10 \Omega \cdot \text{cm}^2$ eine angenäherte Verlustreduktion von $0,144 \text{ mW/cm}^2$ erzielt. Bei einer Eingangsleistung von 100 mW/cm^2 entspricht dies einer angenäherten Effizienzsteigerung von 0,144 Prozentpunkten. In einem realen Bauelement ist eine Validierung durch eine vollständige JV-Analyse erforderlich, da sich auch die MPP-Position verschiebt.

Beispiel für eine Probenreihe bei einem TOPCon-Entwicklungsversuch

Probe	Geändertes Element	Messung	Entscheidungsfrage
Symmetrisch passivierter Wafer	Bedingungen für Oxid und Poly-Si	Injektionsabhängige Lebensdauer, PL.	Hat die Rekombination tatsächlich abgenommen?
Kontaktprüfstruktur	Metallisierungspaste und Feuerprozess	TLM, Linienwiderstand.	Fließt der Strom durch einen ausreichend geringen Widerstand?
Zellvorstufe vor der Metallisierung	Alle Oberflächenbehandlungen	Implizite Spannung	Welche Spannung ermöglichen Material und Oberflächen?
Vollständige Zelle	Die gleiche Prozessvariante.	JV, Suns-Voc, EQE	Wurde der Gewinn in tatsächliche Leistung umgewandelt?
Mini-Modul	Verbindung und Verkapselung	Leistung, EL, Messung nach Beanspruchung.	Bleibt der Gewinn nach der Verkapselung erhalten?

Ziel dieses Ansatzes ist es nicht, für jedes Bauelement jede Analyse durchzuführen. Schnelle und kostengünstige Zwischenprüfungen dienen dazu, teure, vollständige Bauelementtests zu steuern. Es ist jedoch auch nicht korrekt, eine Bedingung, die nur in den Zwischenprüfungen gut abschneidet, als erfolgreich zu bewerten, bevor die finale Zelle betrachtet wurde. Die ausgewählten, wenigen Varianten müssen unbedingt zu vollständigen Bauelementen weiterentwickelt und einer geeigneten Beständigkeitsprüfung unterzogen werden.

Beispiel: Die Spannung stieg an, der Füllfaktor sank

Angenommen, ein neuer Passivierungsprozess erhöht die resultierende Spannung, reduziert aber den Füllfaktor (FF) der fertigen Zelle. Die erste Erklärung ist, dass die Rekombination abnimmt, während der Kontaktwiderstand zunimmt. Die zweite Erklärung ist, dass der Prozess auf einer Oberfläche vorteilhaft ist, auf einer anderen aber nachteilig. Die dritte Erklärung ist, dass sich die Metallgitter- oder Druckgeometrie der Stichprobengruppe unterscheidet. Wenn sich der durch Suns-Voc erhaltene scheinbare Füllfaktor vom tatsächlichen Füllfaktor unterscheidet, wird der widerstandsbedingte Verlust untersucht; TLM- und Linienprofilmessungen ergänzen dies.

Im Vergleichsexperiment wird die Passivierung konstant gehalten und nur die Metallisierung angepasst. Wenn der Füllfaktor wiederhergestellt wird und der Spannungsgewinn erhalten bleibt, wird deutlich, dass der erste Eingriff nicht vollständig negativ war. Dieses Ergebnis führt dazu, dass man nicht vorschnell die Variante „die Passivierung hat nicht funktioniert“ verwirft, sondern stattdessen versucht, die Inkompatibilität zwischen den Grenzflächen zu beheben. Bei der Weiterentwicklung ist es wichtiger, den höchsten Einzelwert zu ermitteln, als zu verfolgen, in welchem Prozess der Verlust auftritt.

Zu beachtende Punkte bei der Umstellung auf die Serienproduktion

Die Position des Wafers im Ofen, die Anzahl der Zyklen nach der Reinigung der Anlage und die Historie des Beschichtungsträgers können versteckte Faktoren sein. Wenn ein Laborbetrieb nur in einem neu gereinigten Raum durchgeführt wird, ist das Produktionsfenster eng. Bei der Prozessübertragung werden Proben vom Anfang, der Mitte und dem Ende der Charge entnommen; die optischen Eigenschaften der Rückseite, die Druckmorphologie und die Randverluste werden überwacht. Produktionsmittelwert, Streubreite und Akzeptanzrate sind getrennte Ergebnisse.

Aufgabe: Entwerfen Sie ein Experiment mit acht verschiedenen Bedingungen, um herauszufinden, welcher Prozess - die Oxidation, die Hydrierung oder die Metallisierung - für das beobachtete Ergebnis verantwortlich ist. Anstatt die „neue Rezeptur“, bei der alle Faktoren gleichzeitig verändert werden, mit der alten Rezeptur zu vergleichen, beschreiben Sie, welche zwei Bedingungen bei den Zwischenproben unterschiedliche Ergebnisse liefern.

Entwicklung von Heteroübergängen: selektive Kontaktentwicklung bei niedrigen Temperaturen

Was bezeichnet der Begriff „Hetero“ in einem Heteroübergang?

Heteroübergang ist ein Übergang zwischen verschiedenen Halbleiterstrukturen oder -materialien. In einer Silizium-HJT-Zelle wird ein kristalliner Siliziumwafer, der Licht absorbiert, zusammen mit sehr dünnen amorphen oder nanokristallinen Siliziumschichten verwendet. **Amorph** bedeutet, dass keine langreichweitige kristalline Ordnung vorhanden ist; **nanokristallin** bedeutet, dass sehr kleine kristalline Bereiche vorhanden sind. Dies sind nicht nur Bezeichnungen für die Oberflächenbeschaffenheit, sondern Strukturen, die das elektronische und optische Verhalten verändern.

In einer typischen Struktur unterstützt die dünne **intrinsische Schicht** zwischen der Kristalloberfläche und der dotierten selektiven Schicht die Oberflächenpassivierung. Die dotierten Schichten begünstigen den bevorzugten Transport von Elektronen oder Löchern. Die obere, transparente leitfähige Oxidschicht, kurz **TCO**, lässt Licht durch und leitet den Strom lateral weiter. Das Metallgitter sammelt diesen Strom für die externe Verbindung. Eine Schicht kann für die Passivierung, eine andere für die Selektivität und eine dritte für die laterale Leitung erforderlich sein; es wird nicht davon ausgegangen, dass sie alle die gleiche Funktion erfüllen.

Was verändert eine niedrige Temperatur?

Dünne, hydrogenierte Schichten und Grenzflächen funktionieren gut, wenn sie einer bestimmten Prozesshistorie unterzogen wurden. Eine nachfolgende hohe Temperatur kann diese Struktur jedoch stören. Das **thermische Budget** beschränkt sich nicht nur auf eine einzelne Höchsttemperatur, sondern bezieht sich auch auf die Dauer, für die jede Schicht welchen Temperaturen ausgesetzt ist. Daher müssen in HJT-Zellen die Metallpaste und die Verbindungsmethode so ausgewählt werden, dass sie mit den Schichten der Zelle kompatibel sind.

Sputtern ist ein physikalisches Abscheidungsverfahren, bei dem Partikel vom Zielmaterial abgelöst und auf der Oberfläche eine Schicht gebildet wird; auf Englisch wird es „sputtering“ genannt. Es kann bei der Herstellung von TCOs verwendet werden, aber die einfallenden Partikel und die Plasmabedingungen können das Substrat beschädigen. Der **Kontaktwiderstand** ist der Preis für das Überwinden der **Grenzfläche**, der **Schichtwiderstand** ist der Preis für die laterale Bewegung durch die

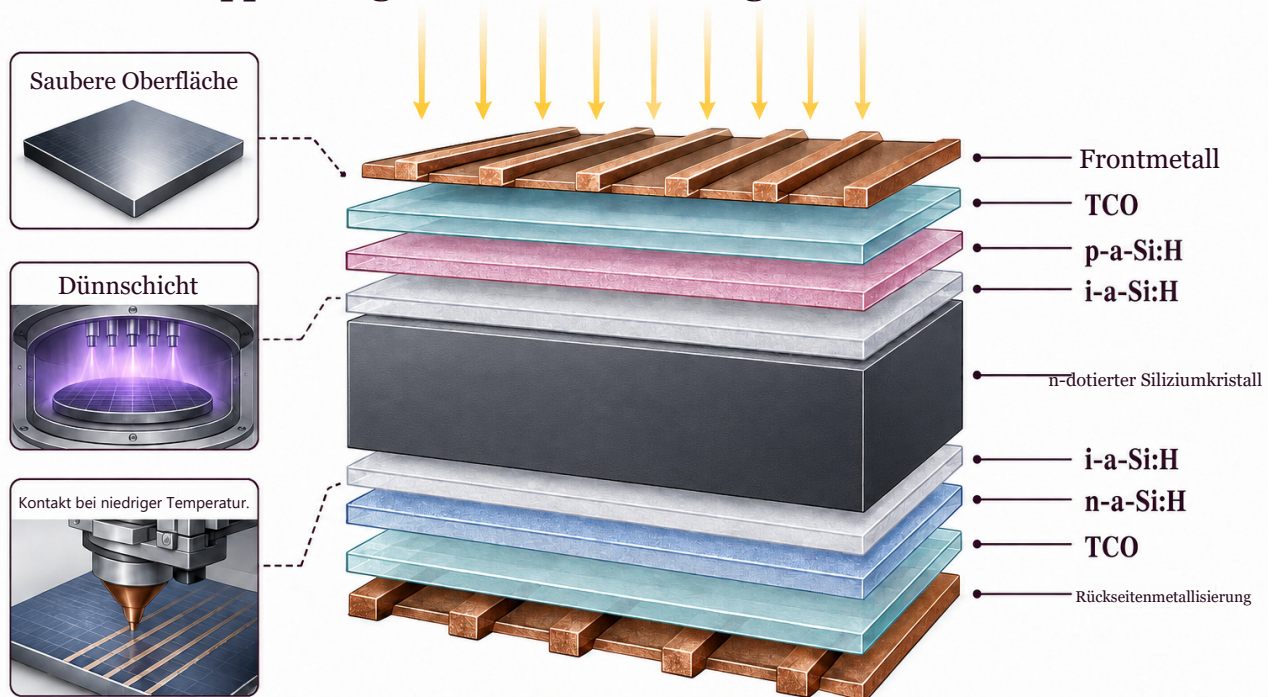
Dünnschicht. Wenn man diese unter einer einzigen „Leitfähigkeits“-Zahl zusammenfasst, erschwert dies die Diagnose.

Synthetische Berechnung: Wenn die Transmission der Beschichtung von 92 % auf 94 % ansteigt, soll der Füllfaktor (FF) aufgrund elektrischer Transportverluste von 0,80 auf 0,77 sinken. Unter der groben Annahme, dass der Strom proportional zur Transmission ist und alle anderen Effekte gleich bleiben, beträgt das Leistungsverhältnis $(94/92) \times (0,77/0,80) \approx 0,983$. Die transparentere Schicht könnte somit etwa 1,7 % weniger Leistung liefern. Die endgültige Entscheidung wird durch eine vollständige spektrale und elektrische Messung getroffen.

Verständniskontrolle: Wie definiert man ein gutes TCO?

Allein ein minimaler Schichtwiderstand oder eine maximale Durchlässigkeit sind nicht ausreichend. Die in der darunterliegenden Schicht verursachten Schäden, die Selektivität des Kontakts, die Haftung und die Kompatibilität mit der abschließenden Metallisierung beeinflussen ebenfalls die Leistung der Zelle. Ein guter Film ist ein Film, der im Verarbeitungsprozess des Zielbauelements gut funktioniert.

Doppelseitiges Grenzflächendesign in einer HJT-Zelle.



Ein typisches Schema; die Schichtdicken sind nicht maßstabsgetreu dargestellt.

Abbildung 03. Eine typische Schichtfolge für eine HJT-Zelle, die n-dotiertes kristallines Silizium verwendet. Die intrinsischen Schichten, die in direktem Kontakt mit beiden Kristalloberflächen stehen, ermöglichen die Passivierung; die dotierten Schichten, das TCO und das Metall werden zusätzlich optimiert. [D09] [D10] [D32] Mit einem Bildgenerierungswerkzeug erstellte konzeptionelle Illustration; keine Messaufnahme.

Die Silizium-Heteroübergangszelle kombiniert die Lichtabsorptionseigenschaft von kristallinem Silizium mit den Oberflächen- und Kontakteigenschaften sehr dünner

amorpher oder nanokristalliner Siliziumschichten. Die Bezeichnungen HJT und SHJ werden für diese Technologiefamilie verwendet. Die Aufgabe des Entwicklers besteht darin, die Oberfläche vor Defekten zu schützen, die richtigen Ladungsträger auszuwählen, Lichtverluste zu vermeiden und den Strom mit geringem Widerstand zu sammeln. Dies sind miteinander verbundene Ziele. Es ist möglich, ein Bauelement mit guter Oberflächenpassivierung, aber aufgrund einer Kontaktbarriere niedrigem Füllfaktor (FF) zu entwickeln.

Die Funktionen der einzelnen Schichten nicht verwechseln

Eine dünne, nicht dotierte, hydrierte amorphe Siliziumschicht, die in direktem Kontakt mit kristallinem Silizium steht, ermöglicht eine effektive Oberflächenpassivierung. Dotierte Schichten tragen zur Ladungsträgerselektivität bei. Ein transparentes, leitfähiges Oxid leitet den Strom lateral und wird Teil des optischen Stapels. Ein Metallgitter sammelt diesen lateralen Strom und leitet ihn zur externen Schaltung. Diese Funktionen sind nicht vollständig voneinander getrennt; beispielsweise beeinflusst die optische Absorption der dotierten Schicht oder die Arbeitsfunktion des leitfähigen Oxids auch andere Ziele.

Huasun veröffentlichte eine Produktionsbeschreibung, die die Reinigung und Texturierung, die beidseitige PECVD-Beschichtung, die Abscheidung von leitfähigem Oxid und die Metallisierung als vier Hauptgruppen einteilt. Jede dieser Gruppen umfasst eine Vielzahl von Kontroll-, Transfer- und Hilfsprozessen; die Aussage „vier Schritte“ bedeutet nicht, dass die gesamte Fabrik nur aus vier Maschinenbewegungen besteht. [D09] Im Forschungsvorhaben sollten diese Hauptgruppen in nachverfolgbare Teilprozesse unterteilt werden.

Oberflächenreinigung und Wartezeit

Die dünne Passivierungsschicht ist empfindlich gegenüber der Chemie der vorbereiteten Oberfläche. Zwei Wafer, die der gleichen Reinigungsbehandlung unterzogen wurden, können unterschiedliche Anfangsgrenzflächen aufweisen, wenn sie unterschiedlich lange in der Luft belassen werden. Die Zeit zwischen den einzelnen Verarbeitungsschritten wird daher dokumentiert. Auch Partikel, die von Handschuhen, Ladungsträgern, der Kabine und der Transferbox stammen, werden untersucht. Wenn in einem Reinigungsexperiment nur die chemische Konzentration geändert und die Transferbedingungen nicht kontrolliert werden, wird die Interpretation des Ergebnisses erschwert.

Die ersten Kontrollproben können symmetrisch passivierte Wafer sein. Nach der gleichen Oberflächenvorbereitung werden beide Seiten mit der gleichen, nicht dotierten Schicht beschichtet, und die injektionsabhängige Lebensdauer wird gemessen. Diese Probe untersucht nicht das Verhalten eines selektiven Kontakts oder eines Metallgitters, sondern zeigt auf einfachere Weise die kombinierte Wirkung der

Oberflächenvorbereitung und der anfänglichen Passivierung. In nachfolgenden Experimenten wird die Messung wiederholt, wobei eine dotierte Schicht und TCO hinzugefügt werden. So kann festgestellt werden, in welcher Phase der Verlust beginnt.

PECVD: Abscheiderate, Schädigung und Mikrostruktur

Wenn die Plasmaleistung erhöht wird, kann sich die Abscheidungsrate ändern; eine schnellere Abscheidung bedeutet jedoch nicht unbedingt eine bessere Filmoberfläche. Die Ionenbombardierung, der Wasserstoffgehalt, die Keimbildung auf der Oberfläche und das unerwünschte epitaktische Wachstum werden bewertet. Selbst wenn die Zeit geändert wird, um die Filmdicke konstant zu halten, können unterschiedliche Plasmabedingungen zu unterschiedlichen Mikrostrukturen führen. Daher sollte die Formulierung „gleiche Dicke“ in der Versuchstabelle nicht implizieren, dass alle anderen Filmeigenschaften gleich sind.

Die Filmdicke kann mittels Ellipsometrie und die Kristallinität mittels Raman-Spektroskopie oder einer geeigneten strukturellen Methode bestimmt werden, die elektrische Leitfähigkeit kann mit speziellen Teststrukturen gemessen werden. Die Eigenschaften eines auf Glas aufgebrachten Films sind jedoch möglicherweise nicht identisch mit denen einer dünnen Schicht von wenigen Nanometern auf kristallinem Silizium. Referenzproben sind nützlich; ihre Grenzen in Bezug auf die Repräsentation des Wachstums auf der tatsächlichen Bauelementoberfläche sollten dokumentiert werden. Es sollte nicht davon ausgegangen werden, dass eine einzelne Charakterisierung die gesamte Grenzfläche beschreibt.

Was können Nanokristall-Kontakte verändern?

In der Studie von Lin und Kollegen aus dem Jahr 2023 wurde der Transportverlust an der Lochkontaktstelle durch die Verwendung von p-Typ-Nanokristall-Silizium und optimiertem TCO reduziert. Die Studie berichtet über zertifizierte Bauelemente, die auf einem etwa 274 cm² großen Wafer industrieller Qualität einen Wirkungsgrad von bis zu 26,81 % erreichen. Der höchste Wert von 86,59 % für den Füllfaktor (FF) stammt von einer anderen Zelle; es ist irreführend, diese beiden Höchstwerte in einer einzigen hypothetischen Zelle zu kombinieren. Die wichtigste Erkenntnis ist, dass es nicht darum geht, Rekorde zu kopieren, sondern die Kontaktleitfähigkeit, die Passivierung und die optischen Verluste separat zu messen und sie dann in einem Bauelement zu kombinieren. [D32]

Bei einem Experiment mit einer Nanokristallschicht dürfen Dicke, Gaszusammensetzung und Plasmaparameter nicht gleichzeitig und unkontrolliert verändert werden. Zuerst wird ein geeignetes Anwendungsfenster ermittelt; anschließend wird die Beziehung zwischen den ausgewählten Variablen und dem Kontaktwiderstand sowie der optischen Transmission ermittelt. Eine Verbesserung ist nur bei hoher Vorwärtsspannung zu beobachten; wenn dies nicht in der Nähe des

MPP (Maximum Power Point) der Fall ist, könnte die physikalische Bedeutung des Arbeitspunktes übersehen worden sein. Die Kontakteigenschaften müssen im relevanten Injektions- und Temperaturbereich bewertet werden.

Optische und elektrische Berechnung von TCO

In einem einfachen, homogenen Film ist der Flächenwiderstand umgekehrt proportional zum spezifischen Widerstand und zur Filmdicke. Allerdings können auch die Ladungsträgerdichte und die Beweglichkeit in Abhängigkeit von den Abscheidungsbedingungen variieren. Dickere TCO-Schichten können zwar einen niedrigeren Flächenwiderstand erzielen, aber auch die parasitäre Absorption erhöhen; insbesondere die Absorption durch freie Ladungsträger und Verluste bei kurzen Wellenlängen werden separat betrachtet. Allein die durchschnittliche Transmission im sichtbaren Bereich ist nicht ausreichend. Das vom Solarzellen-Bauelement genutzte Spektralband und die optischen Interferenzphänomene mit den darunterliegenden Schichten sind von Bedeutung.

$$R_{\square} = \frac{\rho}{t} = \frac{1}{q n \mu t}. \quad (\text{II.5.1})$$

Diese Aussage beschreibt einen einseitigen, geordneten und homogenen Leitungsansatz. Es wird auch in Frage gestellt, ob die aus der Hall-Messung erhaltene Ladungsträgerdichte und die Beweglichkeit die gleiche Bedeutung in der mehrschichtigen Struktur des Bauelements haben. In der Studie werden die Transparenz, die Reflexion, der Flächenwiderstand und der Kontaktwiderstand einer TCO-Variante zusammen berichtet. Wenn die Energieausrichtung der „leitfähigeren“ TCO mit der selektiven Schicht schlechter ist, kann die Gesamtleistung sinken.

Metallisierung bei niedrigen Temperaturen und die Verwendung von Kupfer

Der thermische Energiehaushalt einer Heteroübergangsschicht ist anders als bei herkömmlichen Hochtemperatur-Kontaktglühverfahren. Geeignete Niedertemperatur-Pasten, mehrfache Verbindungen oder metallbasierte Beschichtungsverfahren zur Metallisierung gewinnen daher an Bedeutung. Die Forschung im Bereich der Metallisierung betrachtet gleichzeitig die Leitfähigkeit, die Haftung, die Linienbreite, die Oberflächenbeschädigung und die Kontaktstabilität nach dem Altern. Die Reduzierung des Silberverbrauchs allein ist kein endgültiger Erfolg; eine geringe Akzeptanzrate oder eine schwierige Rückgewinnung können zusätzliche Kosten verursachen.

Bei der Kupferbeschichtung werden neben dem elektrischen Kontakt auch die Diffusionsbarriere, die selektive Abscheidung, die Maskierung, die Korrosionsbeständigkeit und die Kompatibilität der Verbindungen bewertet. Die

Bezeichnung „silberfrei“ beweist nicht, dass die gesamte Lieferkette umweltfreundlich ist. Prozesschemikalien, Abwasserbehandlung, Geräte wartung und Dickenkontrolle werden in die Kostenkalkulation einbezogen. Dieser Abschnitt beschreibt nicht die geheime Beschichtungsrezeptur eines bestimmten Unternehmens, sondern definiert, welche Funktionen während der Forschung validiert werden sollen.

Matrix zur Problemlösung

Beobachtung	Mögliche Erklärung	Messung zur Unterscheidung
Die Lebensdauer nach der Beschichtung ist gering.	Oberflächenkontamination oder Plasmabeschädigung.	Reinigungskontrolle; Lebensdauerermessung nach jedem Schritt
Gute implizite Spannung, niedriger FF	Selektiver Kontakt oder TCO-Widerstand.	Suns-Voc, TLM, temperaturabhängige JV
Der Strom ist niedrig, die Spannung bleibt erhalten.	Parasitäre Absorption oder Reflexion.	EQE, spektraler Reflexions-/Transmissionsgrad, optisches Modell
Die anfängliche Leistung ist gut, es kommt jedoch nach der Verbindung zu einem Leistungsabfall.	Mechanische oder thermische Beschädigung.	EL- und JV-Messungen vor/nach der Verbindung.
Leistung ändert sich am Chargenende	Beschichtungsaufbau in der Kammer; Quellendrift	Zyklusreihenfolge, Karte der Begleitproben

Forschungsbeispiel: Warum hat die Schicht mit dem geringsten Widerstand nicht gewonnen?

Betrachten wir drei TCO-Varianten. Die erste soll den niedrigsten Flächenwiderstand, die zweite die höchste Lichtdurchlässigkeit und die dritte die beste Leistung der fertigen Zelle aufweisen. Die dritte Option könnte eine Balance zwischen optischen und elektrischen Verlusten darstellen. Um dies zu zeigen, müssen alle Varianten mit derselben Metallgittergeometrie verglichen und der Fingerabstand separat optimiert werden. Die beste TCO-Auswahl ist nicht unabhängig von der Gitterkonstruktion.

In der nächsten Phase werden die beiden besten TCO-Materialien mit zwei verschiedenen Gitterabständen kombiniert. So lässt sich feststellen, ob das Material, das in der ersten Auswahl unterlegen war, unter einer anderen Geometrie besser abschneidet. Diese experimentelle Idee wandelt die HJT-Entwicklung von der „Optimierung einer einzelnen Schicht“ in die Aufgabe, ein mehrschichtiges Bauelement gemeinsam zu gestalten.

Rückkontaktzellen: Muster, Isolierung und Transportweg

Welches Problem wird durch die Anordnung der Kontakte auf der Rückseite gelöst?

Die Metallschicht auf der Vorderseite blockiert einen Teil des Lichts. Der Ansatz mit dem **Rückkontakt** kann diese Abschattung reduzieren, indem er die Verbindungen von Elektronen und Löchern zur Rückseite verlagert. Die beiden Ladungsträger müssen weiterhin zu getrennten, selektiven Kontakten gelangen. Daher ist die Rückseite so angeordnet, dass sie aus ineinandergreifenden, aber elektrisch getrennten Bereichen besteht. Die **Strukturierung** bezieht sich auf die Erzeugung der Position und Größe dieser Bereiche.

Der Kontaktbereich und das Kontaktmaterial stellen unterschiedliche Designaspekte dar. Die Anordnung des Rückkontakts kann mit verschiedenen Passivierungs- und Heteroübergangskonzepten kombiniert werden. Die kommerziellen Abkürzungen der Unternehmen können bestimmte Kombinationen dieser Optionen bezeichnen; das Vorhandensein einer solchen Abkürzung bedeutet jedoch nicht, dass die genaue Schichtrezeptur bekannt ist.

Abstand, Isolierung und Ausrichtung ändern sich gleichzeitig

Linienabstand ist der Abstand zwischen benachbarten Musterelementen. Wenn der Abstand größer wird, legen einige Ladungsträger eine längere laterale Strecke zurück. Wenn der Abstand kleiner wird, können die Musterung und die Isolierung eine höhere Präzision erfordern. Ein **Shunt** ist ein unerwünschter elektrischer Leckstrom zwischen Bereichen, die voneinander getrennt sein sollen. Die **Ausrichtungstoleranz** definiert, wie stark ein Prozessmuster relativ zum vorherigen Muster verschoben werden kann.

Synthetische Geometrie: Der zwischen zwei Metallbereichen vorgesehene Isolationsabstand soll 40 µm betragen. Wenn pro Seite ein unkontrollierter Überlauf oder eine Positionsänderung von 10 µm auftritt, verringert sich der nutzbare Isolationsabstand erheblich. Diese einfache Zahl allein stellt keine Prozess-Toleranzberechnung dar; es sind auch die Linienbreite, die Korrelation der beiden Seiten und die Messdefinition erforderlich. Den im Entwurf ausreichend großen Isolationsabstand in der Produktion zuverlässig zu erhalten, ist ein separates Problem.

Der Laserprozess kann durch lokale Energieabgabe Material abtragen oder verändern. **Maskierung** sorgt dafür, dass nur der ausgewählte Bereich bearbeitet wird. **Ätzen** entfernt die Zielschicht. Alle diese Verfahren können Geometrien erzeugen, aber die Schäden und Rückstände, die sie auf der darunterliegenden Schicht hinterlassen,

sind nicht gleich. Das Vorhandensein klar definierter Linien unter dem Mikroskop garantiert nicht die elektrische Isolation.

Die Rückseite kann auch dazu dienen, Licht zu reflektieren oder in einem bifazialen Design Licht einzufangen. Daher ist die Veränderung der Position der Kontakte nicht nur eine Änderung des elektrischen Schaltplans, sondern auch eine Änderung des optischen Designs. Die folgenden Experimente zur Optimierung werden die Musterqualität, die Transportlänge und die Passivierung mit separaten, beobachtbaren Parametern in Beziehung setzen.

Verständniskontrolle: Die Linie ist gut, die Zelle hat einen niedrigen Füllfaktor

Das Bild bestätigt einen Teil der Geometrie. Zusätzlich sollten Sie den Isolationsleckstrom, den Kontaktwiderstand und den Prozessschaden für den FF-Verlust messen. Wenn sich bei Änderung der Linienbreite gleichzeitig die Transportlänge ändert, kann man nicht von einem einzelnen Effekt sprechen; das Design der Kontrollversuche sollte diesen Unterschied berücksichtigen.



Abbildung 04. Bei der Gestaltung der Rückkontakte haben die Optik der Vorderseite und das Muster der Rückseite unterschiedliche Funktionen. Die beiden Kontaktnetze müssen voneinander isoliert bleiben; Ausrichtung, Abstand und Transportstrecke müssen gemeinsam betrachtet werden. Die Kontaktphysik hängt von der gewählten Architektur ab. [C01] [C02] [D10] Mit einem Bildgenerierungswerkzeug erstellte konzeptionelle Illustration; keine Messaufnahme.

Bei der Architektur des Rückkontakts werden die Bereiche zur Sammlung von Elektronen und Löchern auf die Rückseite der Zelle verlagert. Die Reduzierung der

Abschattung durch das Metallgitter auf der Vorderseite bietet einen optischen Vorteil; im Gegenzug müssen auf der Rückseite die beiden Polaritäten voneinander isoliert werden, die Ladungsträger müssen den richtigen Kontaktbereich erreichen und die Metallkontakte müssen zuverlässig strukturiert werden. BC ist eine Familie von Anordnungen. Die Passivierung kann auf ähnliche Weise wie bei TOPCon, auf Basis eines Heteroübergangs oder mit anderen selektiven Kontakten erfolgen, was eine separate Wahl darstellt.

BC, TOPCon und HJT lassen sich nicht auf derselben Klassifizierungsebene einordnen

Um einen Produktnamen in eine physikalische Architektur zu übersetzen, wird eine dreischichtige Klassifizierung verwendet. Die erste Schicht ist der Absorber: kristallines Silizium, Perowskit oder ein anderes Material. Die zweite Schicht ist die Kontaktp Physik: Diffusionsübergang, oxid/poly-Si-passivierter Kontakt, amorphes Silizium-Heteroübergang usw. Die dritte Schicht ist die Kontaktanordnung: Vorder- und Rückseite, alles auf der Rückseite, bifazial oder eine andere Anordnung. Wenn diese Unterscheidung nicht getroffen wird, kann die Frage „BC oder HJT?“ fälschlicherweise so formuliert werden, als ob es zwei sich gegenseitig ausschließende Optionen gäbe.

Die Studie von Yoshikawa und seinen Kollegen aus dem Jahr 2017 ist ein Beispiel für eine großflächige Siliziumzelle, die eine Heteroübergangs- und eine interdigitale Rückkontakt-Design-Architektur kombiniert. Der veröffentlichte Ansatz basiert auf der gleichzeitigen Verbesserung der Lebensdauer, der optischen Eigenschaften und der Serienwiderstandsverluste. Diese historische Darstellung zeigt, dass BC nicht nur die Entfernung der vorderen Gitterstruktur bedeutet. [D10] Die aktuellen Unternehmensmarken bedeuten jedoch nicht, dass sie direkt denselben Prozess wie in diesem Artikel verwenden.

Geometrie der Ladungsträgersammlung

Auf der Rückseite befinden sich zwei ineinandergreifende Kontaktnetze. Diese Netze müssen sowohl elektrisch voneinander getrennt sein als auch in Abständen angeordnet werden, sodass die Ladungsträger die Kontakte erreichen können, ohne dass es zu einer Rekombination kommt. Wenn der Kontaktabstand vergrößert wird, kann die Strukturierung einfacher gestaltet werden, aber die laterale Transportstrecke wird größer. Wenn der Abstand verkleinert wird, kann der Leitungsweg verkürzt werden, aber die Toleranz bei der Ausrichtung, der Isolationsabstand und die Prozesskomplexität werden kritischer. Das tatsächliche Optimum hängt von der Lebensdauer des Wafers und der Oberflächenpassivierung ab.

$$L = \sqrt{D\tau}. \quad (\text{II.6.1})$$

Die Diffusionslänge dient hier als Maßstab für eine erste Abschätzung. Es gibt keine scharfe Schwelle im Sinne von „Wenn der Kontaktabstand kleiner als L ist, werden alle Ladungsträger gesammelt“. Die Generationstiefe, die Übergangsgeometrie, das elektrische Feld, die Injektion, Oberflächenverluste und dreidimensionale Strompfade beeinflussen das Ergebnis. Deshalb muss die geometrische Auslegung anhand des optischen Generationsprofils und eines elektrischen Modells geprüft und anschließend mit lokalen Messungen bestätigt werden.

Methoden zur Strukturierung und häufige Probleme

Masken, Fotolithografie, Laserbearbeitung oder selektive chemische Ätzung bieten unterschiedliche Verfahren zur Strukturierung. Für jedes Verfahren gibt es gemeinsame Fragen, die beantwortet werden müssen: Wie reproduzierbar ist die Position der Kanten? Bleiben Schäden unter der geätzten Schicht zurück? Befindet sich zwischen den beiden Polen noch ein leitfähiges Material? Verändert die Waffelkrümmung die Ausrichtung? Bleibt die Mustergenauigkeit erhalten, wenn sich die Bearbeitungsfläche vergrößert? Diese Fragen definieren die durch die Geometrie vorgegebenen Toleranzen, bevor die Geräteherstellung beginnt.

Wenn ein Laser verwendet wird, wird nicht nur die durchschnittliche Leistung aufgezeichnet. Die Pulsenergie, die Wiederholfrequenz, der Fokus, die Scanrate, die Pulsüberlappung und die thermische Vorgeschichte des Substrats sind von Bedeutung. Die gleiche Energiedichte kann bei unterschiedlichen Pulsdauern unterschiedliche Schäden verursachen. Eine optisch einwandfreie Linie muss nicht unbedingt eine elektrisch isolierte Linie sein. Optische Mikroskopie, Profilmessung und lokale elektrische Tests werden kombiniert eingesetzt.

Ein Ausrichtungsbudget erstellen

Das Layout-Budget berücksichtigt die kumulierten Positionsfehler überlappender Prozesse. Der entworfene Isolationsabstand muss gegenüber der Streuung der Druckbreite, der Position der Laserlinie, der dimensionalen Veränderung des Wafers und dem Maschinenjustierfehler beständig sein. Das Addieren aller Toleranzen in der ungünstigsten Weise ist zu konservativ; das einfache Addieren der Quadrate, ohne zu messen, ob sie unabhängig sind, kann zu optimistisch sein. In der ersten Phase werden die Streuungen gemessen und kritische Überschreitungsszenarien identifiziert.

In dem Beispiel sei die nominale Lochgröße $100\text{ }\mu\text{m}$. Wenn sich die Metallkante auf beiden Seiten um $20\text{ }\mu\text{m}$ verbreitert und der Ausrichtungsfehler ebenfalls $30\text{ }\mu\text{m}$ in die gleiche Richtung wirkt, wird der verbleibende Sicherheitsabstand sehr gering. Diese Zahlen stellen nicht das Design eines bestimmten BC-Produkts dar, sondern sind ein geometrisches Beispiel, das zeigt, warum die Toleranzen die akzeptable Kurzschlussrate beeinflussen können, bevor die Leistung berücksichtigt wird. Es ist riskant, zu einer schmalen Linie überzugehen, bevor der dimensionale Puffer vollständig definiert ist.

Rückseitenoptik und Bifazialität

Das Fehlen eines Gitters auf der Vorderseite bedeutet nicht, dass alle optischen Verluste eliminiert werden. Die vordere Passivierung und Reflexion, die Reflektivität der hinteren Metallschicht, die parasitäre Absorption der passivierten Kontakte und die Modulverkapselung sind weiterhin von Bedeutung. Wenn Licht von der Rückseite eingefangen werden soll, besteht ein zusätzliches Gleichgewicht zwischen dem Metallfüllgrad und dem elektrischen Widerstand. Es wird nicht davon ausgegangen, dass BC einseitig sein muss oder dass alle BC-Zellen eine hohe Bifazialität aufweisen. Aus diesem Grund werden bei einem Produktvergleich die Anfangsleistung, der Bifazialitätsfaktor und die tatsächliche Hinterstrahlungsleistung separat angegeben. Eine Zelle mit hoher Hinterstrahlungsleistung erzielt möglicherweise nicht die gleiche Leistung auf einem dunklen Dach mit geringer Reflexionsfähigkeit. Die Umrechnung der Zellarchitektur in Feldwerte wird zusammen mit der Montagehöhe, dem Reihenabstand und der Oberflächenreflexionsfähigkeit berechnet. Die in der Unternehmensbroschüre angegebene jährliche Energiedifferenz wird nur im Rahmen des definierten Szenarios interpretiert.

Den Firmennamen in eine technische Frage umwandeln

Die Beschreibungen von LONGIs HPBC 2.0/Hi-MO X10 definieren eine Produktlinie, die sich um die hybride Passivierung, den Rückkontakt und das Verbindungskonzept dreht. Die ABC-Beschreibungen von AIKO betonen alle das Rückkontaktlayout und den Ansatz der metallfreien Metallisierung. [C01] [C02] Dies sind die Aussagen der jeweiligen Unternehmen; es kann nicht gesagt werden, dass alle Produkte, die die gleiche Buchstabenkombination verwenden, in Bezug auf Prozess oder Leistung gleichwertig sind. Ein detaillierter und datumsbehafteter Unternehmensvergleich findet sich im sechzehnten Kapitel.

Aus diesen Erklärungen sollte der Forscher eine Forschungsfrage ableiten: In welchem Umfang wurde die Kontaktverschattung reduziert? Welcher Anteil der Verbesserung ist auf die Flächenausnutzung oder die Zellplatzierung zurückzuführen? Wie wurde der Einfluss der Metallisierungsänderung auf den Kontaktwiderstand und die Beständigkeit gemessen? Sind die Flächenangaben für die verwendeten Zell- und Modulleistungsdaten identisch? Diese Fragen sind lehrreicher, als einfach eine große Zahl aus der Broschüre zu wiederholen.

Beispielversuch: Ist die Qualität der Linienführung oder die Qualität des Materials entscheidend?

In beiden Varianten der Rückseitenstruktur sollen das gleiche Ausgangswafersubstrat und die gleiche Passivierung verwendet werden. In der einen Variante soll der Füllfaktor (FF) niedrig sein, in der anderen die Spannung. In der ersten Gruppe können diskontinuierliche Metalllinien oder lange Stromwege vorhanden sein; in der zweiten Gruppe kann Laserschaden oder ein Leckstrom zwischen den Polaritäten in Betracht gezogen werden. Die Elektrolumineszenzbilder (EL) werden bei gleichem Strom verglichen, und es werden zusätzlich Messungen der Dunkel-Kennlinie (JV) und der lokalen Widerstände durchgeführt. Es sollte beachtet werden, dass, wenn die Bildhelligkeit mit einer automatischen Farbskala normalisiert wird, der tatsächliche Unterschied möglicherweise nicht erkennbar ist.

Merkmal	Vorrangige Prüfung	Nächste Intervention.
In regelmäßigen Abständen angeordnete dunkle Streifen.	Kontaktkontinuität und laterale Ladungsträgerbewegung	Abstand zwischen den Fingern bzw. Dicke der Metallschicht.
Leckstrom an der Mustergrenze.	Restfilm, Schädigung, Ausrichtung	Bedingungen für Entfernung und Isolation
Niedrige Spannung über die gesamte Zelle.	Lebensdauer und Oberflächenpassivierung	Thermische/Reinigungshistorie
Geringe Akzeptanzrate an den Rändern.	Randisolierung, Musterüberlauf	Randgeometrie und Vorrichtung
Leistungsverlust nach der Modulfertigung	Verbindungen und mechanische Beanspruchung	Zellverbindungsdesign

Erfolgsindikator

Der Erfolg bei der BC-Entwicklung beschränkt sich nicht auf das ästhetische Erscheinungsbild der Vorderseite oder den Wirkungsgrad der besten Zelle. Die Herstellung desselben Musters über eine große Fläche und in mehreren Chargen, die Kontrolle der Kurzschluss- und Bruchrate, der Modul-Übertragungsverlust und die Zuverlässigkeit werden gemeinsam betrachtet. Nicht nur die Anzahl der Prozessschritte ist wichtig, sondern auch die Toleranz jedes einzelnen Schritts. Geringfügige Abweichungen in einigen kritischen Ausrichtungsschritten können die gesamte Akzeptanzrate der Zellen bestimmen.

Aufgabe: Beschreiben Sie den Querschnitt und die Draufsicht der von Ihnen entworfenen Zelle mit Rückseitenkontakt in separaten Zeichnungen. Geben Sie für jede Schicht die Auswahl der Ladungsträger, für jede Linie die elektrische Verbindung und

für jedes Loch den Zweck der Isolierung an. Listen Sie anschließend drei mögliche Kurzschlusspfade und die Messungen auf, mit denen diese erfasst werden können.

Perowskit-Entwicklung: von der Zusammensetzung über die Tinte bis zum homogenen Film

Tinte ist mehr als nur eine Formel

Bei der Herstellung von Perowskit-Filmen ist die **Tinte** eine Prozessmischung, die aus Vorläufern, Lösungsmitteln und gegebenenfalls Additiven besteht, um die gewünschte Zusammensetzung zu erreichen. Die **Konzentration** gibt an, wie viel Substanz pro bestimmtem Volumen oder Masse vorhanden ist. Ein **Mol** ist die Mengeneinheit für eine Substanz, die etwa $6,022 \times 10^{23}$ Teilchen enthält. Die **Stöchiometrie** bezieht sich auf die numerischen Verhältnisse in einer Reaktion oder in der Zielzusammensetzung. Die gleiche Stöchiometrie kann bei unterschiedlichen Lösungsmitteln und unterschiedlicher Alterung nicht das gleiche Beschichtungsverhalten zeigen.

Viskosität beschreibt den Widerstand gegen das Fließen; **Oberflächenspannung** beschreibt die Tendenz einer Flüssigkeit, ihre Oberfläche zu minimieren. **Benetzung** bezeichnet, wie sich eine Flüssigkeit auf einer festen Oberfläche ausbreitet. **Meniskus** ist die gekrümmte Flüssigkeitsoberfläche, die am Rand einer Beschichtung entsteht. Diese Eigenschaften helfen dabei, zu verstehen, warum ein Film, obwohl seine chemische Zusammensetzung korrekt ist, Streifen, Löcher oder eine ungleichmäßige Dicke aufweist.

Der Weg vom flüssigen Film zum Kristall

Während des Beschichtungsprozesses wird die Flüssigkeit auf der Oberfläche verteilt. Mit dem Verdampfen des Lösungsmittels steigt die Konzentration an; es kommt zur **Keimbildung**, dem Beginn der Kristallbildung, und zum Wachstum dieser Keime. Beim **Trocknen** verdunstet das Lösungsmittel, und bei der **Kristallisation** bilden sich geordnete Strukturen aus Atomen und Ionen. Beide Prozesse beeinflussen sich gegenseitig, sind aber nicht dasselbe. Obwohl die Oberfläche trocken erscheint, können unerwünschte Zwischenphasen oder Lösungsmittelrückstände vorhanden sein.

Spin-Coating verteilt eine Flüssigkeit auf einer rotierenden Oberfläche. Beim **Blade-Coating** wird eine bewegliche Kante verwendet, um einen feuchten Film zu erzeugen. Ein **Slot-Die** ist ein Beschichtungskopf, der eine kontrollierte Flussrate auf eine Oberfläche mit einer bestimmten Breite aufbringt. Die **Flussrate** ist das Volumen, das pro Zeiteinheit durchfließt. Bei einer idealen, kontinuierlichen Beschichtung steht

die feuchte Schichtdicke in Beziehung zum Verhältnis von Flussrate, Beschichtungsbreite und Geschwindigkeit. **Synthetisches Beispiel:** Wenn die Geschwindigkeit verdoppelt wird und die Flussrate gleich bleibt, während alle anderen Bedingungen gleich bleiben, halbiert sich die feuchte Schichtdicke. In der Realität müssen auch ein stabiler Meniskus und die Trocknungsbedingungen erhalten bleiben.

Vakuumabscheidung erzeugt Schichten durch den Einsatz von Dampf oder Partikelströmen anstelle von Lösungsmittel enthaltenden Tinten. Bei der **gleichzeitigen Verdampfung** erfolgt der Fluss mehrerer Komponenten gleichzeitig; bei der **sequenziellen Abscheidung** werden die Komponenten in verschiedenen Schritten eingebracht. Der Name der Methode allein zeigt nicht, dass die Zusammensetzung und die Dicke homogen sind. Im Folgenden werden wir die Methoden vergleichen und dabei aufzeigen, welche physikalische Kontrolle sie ermöglichen und welche neuen Fehlerquellen sie potenziell verursachen können.

Verständniskontrolle: Warum liefert die gleiche Rezeptur unterschiedliche Filme?

Vergleiche das Lösungsmittelverhältnis, die Standzeit der Tinte, die Oberflächenreinigung, die Umgebungsfeuchtigkeit, die Geschwindigkeit, die Durchflussrate und die Trocknungshistorie. Die einzelne chemische Formel in der Rezeptur beschreibt nicht den gesamten Prozessablauf. Trenne bei der Probenregistrierung die Schritte der Tintenherstellung, Beschichtung und Temperung voneinander.

Vier Prozesswege bei der Herstellung von Perowskit-Filmen.

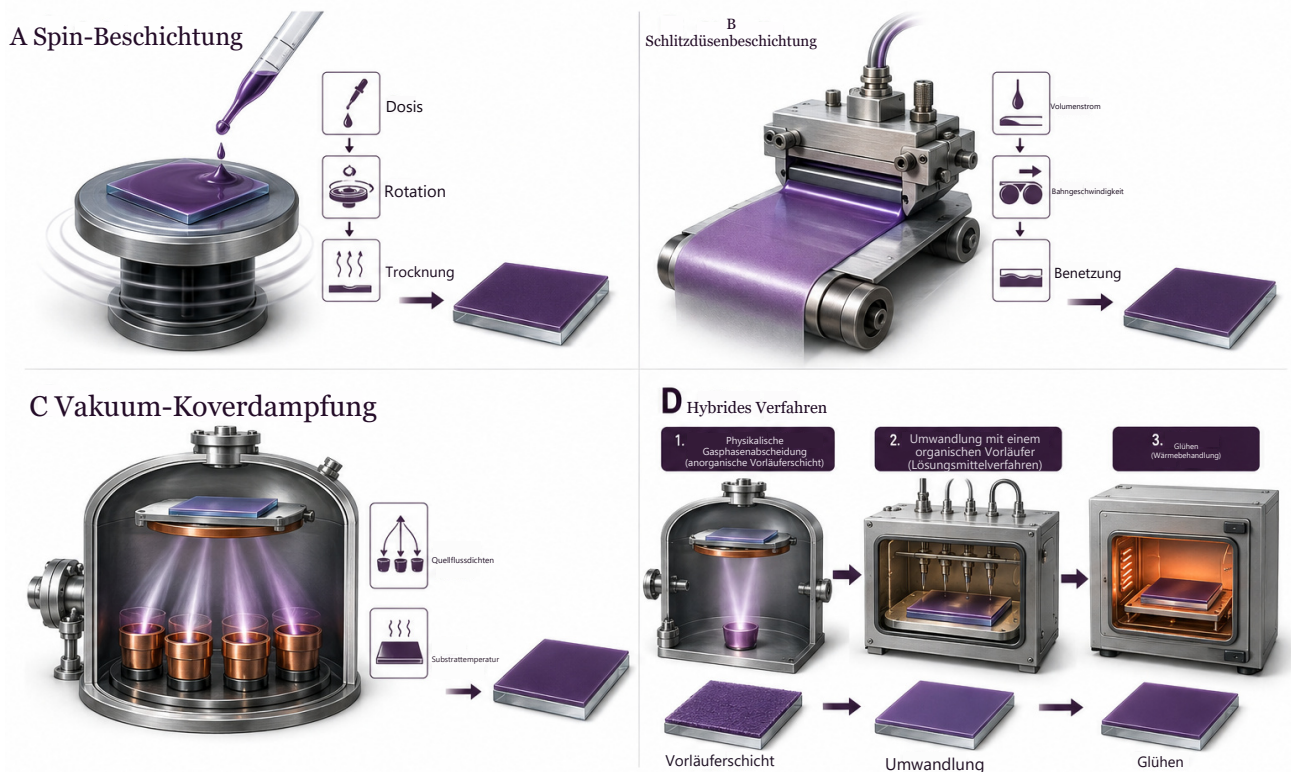


Abbildung 05. Vier repräsentative Verfahren zur Herstellung von Perowskit-Beschichtungen. Bei den Flüssigphasenverfahren sind Fluss und Trocknung von Bedeutung; bei den Vakuum- und Hybridverfahren spielen Quellenfluss, Oberflächenreaktion und Umwandlung eine wichtige Rolle. Die alleinige Angabe einer Methode bestimmt nicht die Qualität des Films. [D12] [D13] [D33] Mit einem Bildgenerierungswerkzeug erstellte konzeptionelle Illustration; keine Messaufnahme.

Die Entwicklung einer Perowskit-Solarzelle ist mehr als nur das Aufbringen einer Salzmischung und das Messen des Wirkungsgrads. Die Absorberzusammensetzung, die Lösungsmittelkoordination, die Zwischenphasen, die Keimbildung, die Trocknung, die Korngrenzen und die beiden Grenzflächen bilden zusammen das Bauelement. Der Grund, warum ein erfolgreiches Spin-Coating-Verfahren in einem kleinen Bereich nicht direkt auf eine Slot-Die-Anlage übertragen werden kann, liegt darin. Die Entwicklungsfrage ist nicht nur „welche Chemikalie?“, sondern „welche Chemikalie, unter welchen Fluss- und Trocknungsbedingungen und auf welcher Oberfläche?“.

Zuerst die Bauelementarchitektur festlegen

Die n-i-p- und p-i-n-Schichtanordnungen beschreiben die Anordnung der Ladungsträger-selektiven Schichten von der Seite, von der das Licht einfällt. Die Veränderung der Elektron- und Lochtransport-Schichten beeinflusst auch die Benetzung der Unterseite, die Filmnukleation und die Toleranz des oberen Kontaktherstellungsprozesses. Daher kann man bei einem Experiment, das angeblich nur die Perowskit-Zusammensetzung vergleicht, die Ergebnisse nicht als den Effekt einer einzelnen Zusammensetzung interpretieren, wenn auch die Ladungsträger-Schichten verändert wurden.

Das erste Referenzbauelement sollte mit so wenigen Variablen wie möglich aufgebaut werden. Die Versionen für Substrat/TCO, untere Selektionsschicht, Absorber, obere Selektionsschicht und Metallelektrode werden festgelegt. Allein die Tatsache, dass eine Oberfläche der Beschichtung besser benetzt wird, bedeutet nicht, dass dies zu einem elektrisch besseren Kontakt führt. Es muss nachgewiesen werden, dass eine gute Benetzung mit einer geringen Rekombination an der Grenzfläche einhergeht. Für jedes neue Molekül beantwortet ein vollständiges Bauelement, ein Dünnschicht und eine geeignete Halbzellenkontrolle unterschiedliche Fragen.

Die vier verschiedenen Achsen des Zusammensetzungsdesigns

Die Zusammensetzung aus A- und B-Kationen mit Halogenen beeinflusst die Bandlücke, die Phasenstabilität, die Defektchemie und die Kristallisation. Es ist unzureichend, all diese Faktoren auf einen einzigen geometrischen Toleranzfaktor zu reduzieren. Bei der Veränderung der Halogenzusammensetzung für eine breite Bandlücke wird die Zusammensetzung unter Lichteinwirkung auf mögliche Zersetzung oder Spannungsverluste untersucht. Bei der Umstellung auf zinnhaltige Systeme für eine schmale Bandlücke werden die Kontrolle der Oxidation und Dotierung wichtig. Ein hoher anfänglicher Wirkungsgrad beweist nicht, dass sich die Zusammensetzung unter Betriebsbedingungen nicht verändert.

Es wird angegeben, dass bei der Zusammensetzungsanalyse die verwendeten Verhältnisse entweder Molenbrüche, Vorläuferverhältnisse oder in der abschließenden Schicht gemessene Elementverhältnisse sind. Das der Lösung zugesetzte Verhältnis muss nicht unbedingt dem Verhältnis in der abschließenden Schicht entsprechen, da es zu einem Verlust flüchtiger Bestandteile oder zu einer unvollständigen Umwandlung kommen kann. XRF-, XPS- und ICP-Methoden erfordern unterschiedliche Probenentnahmetiefen und -vorbereitungen. Das aus einer Methode resultierende Oberflächenverhältnis sollte nicht als repräsentativ für die gesamte Volumenkonzentration des Films dargestellt werden.

Die Definition von Tinte als Material

Die Tintenformulierung umfasst die Identität und Reinheit der Vorläufer, die Chargennummer, die Art der Lösungsmittel, die Gesamtkonzentration, die Misch- und Wartezeit, die Filtration, die Lagerbedingungen und die Haltbarkeit. Viskosität, Oberflächenspannung und Flüchtigkeit bestimmen das Beschichtungsverhalten. Zwei Tinten mit der gleichen Konzentration können aufgrund unterschiedlicher Lösungsmittelkoordination unterschiedliche Keimbildungsraten aufweisen. Die Änderung des Lösungsmittelvolumens kann manchmal nicht nur die Dicke, sondern auch die Bildung einer Zwischenphase beeinflussen.

Die Alterung von Tinte kann systematisch untersucht werden. Proben aus derselben Produktionscharge werden nach unterschiedlichen Lagerzeiten beschichtet; eine frisch zubereitete Kontrollprobe wird jedem Beschichtungstag hinzugefügt. Andernfalls würden die Tintenalterung und die täglichen Schwankungen im Labor vermischt. Bei der Wiederholung zwischen Chargen werden neue Messungen und neue Lösungsmittel verwendet; Teilproben, die aus derselben Flasche entnommen werden, gelten nicht als unabhängige Wiederholungen der chemischen Zubereitung.

Was leistet Spin-Coating gut, und was bildet es nicht ab?

Das Spin-Coating-Verfahren eignet sich gut zum Aufbringen von Filmen auf kleinen Substraten und für chemische Vergleichsstudien. Die Drehgeschwindigkeit, die Beschleunigung, die Tropfzeit, die Umgebung und die Anwendung eines Antisolvens beeinflussen die Filmbildung. Ein erheblicher Teil des Materials kann außerhalb des Substrats abgetragen werden. Die Strömungsgeometrie und die Trocknungsgeschichte unterscheiden sich von einem kontinuierlichen Film, der sich entlang einer Linie bewegt. Daher wird nicht davon ausgegangen, dass die besten Ergebnisse, die beim Spin-Coating erzielt werden, auch beim Slot-Die-Verfahren erzielt werden.

In einer Studie zur Maßstabsübertragung gibt es zwei Phasen. Zuerst wird dieselbe Tinte mit verschiedenen Methoden getestet, um den Einfluss der Methode zu untersuchen. Anschließend wird für jede Methode eine separat optimierte Tinte verglichen. Der erste Vergleich befasst sich mit der Übertragbarkeit des Prozesses, der zweite mit der praktischen Leistung, die mit den einzelnen Methoden erzielt werden kann. Wenn man diese beiden Fragen in einer einzigen Tabelle zusammenfasst, kann dies dazu führen, dass eine Methode fälschlicherweise als schwach oder stark dargestellt wird.

Beschichtung mit einem Rakelverfahren: bewegliche Meniskusbildung und Trocknung

Bei der Beschichtung mit einem Rakel bildet die Flüssigkeit einen Film, der über einen Meniskus verteilt wird, der durch die bewegliche Rakel oder das Substrat erzeugt wird. Der Rakelabstand, die Geschwindigkeit, die Substrattemperatur, die Oberflächenenergie und der Gasfluss sind kritische Variablen. Die Dicke des feuchten Films ist in jedem Fall nicht gleich dem Rakelabstand. Da sich das Verhältnis zwischen Fluss, Kapillarkräften und der relativen Bedeutung der Verdunstung ändert, kann sich auch die Beziehung zwischen Geschwindigkeit und Dicke ändern. Der experimentelle Bereich sollte nicht durch ein einzelnes lineares Modell übermäßig erweitert werden.

Die Studie von Deng und Kollegen aus dem Jahr 2018 ist ein historisches Beispiel, das zeigt, dass sehr kleine, oberflächenaktive Additive den Trocknungsfluss und die Benetzung verändern können. In derselben Studie werden die Ergebnisse für kleine Zellen und Module mit größerer Öffnungsfläche separat berichtet. Diese Unterscheidung zeigt, dass bei der Maßstabsvergrößerung die Filhomogenität und die Verbindungseffekte genauso wichtig sind wie die Zellchemie. [D13] Daraus lässt sich nicht die Schlussfolgerung ziehen, dass „jedem Tintenbestandteil die gleiche Zugabe beigemischt werden sollte“.

Schlitzdüsenbeschichtung: erste Berechnung von Volumenstrom und Geschwindigkeit

Bei einem Slot-Die-Beschichtungskopf wird die Tinte mit kontrollierter Flussrate durch einen Spalt aufgetragen. Bei einem einfachen, stabilen und verlustfreien Nassbeschichtungsverfahren ergibt sich folgende erste Abschätzung für die Volumenkonservierung:

$$h_{\text{wet}} \approx \frac{Q}{w v}. \quad (\text{II.7.1})$$

Hierbei ist Q der volumetrische Durchfluss, w die Beschichtungsbreite und v die Substratgeschwindigkeit. Wenn in einem Beispiel $Q = 0,10 \text{ ml/min}$, $w = 5 \text{ cm}$ und $v = 100 \text{ cm/min}$ gewählt werden, beträgt die Feuchtschichtdicke etwa $2 \text{ }\mu\text{m}$. Wenn ein fester Volumenanteil von 20 % angenommen wird, beträgt die Trockenschichtdicke mit einer einfachen Schrumpfungsapproximation etwa $0,4 \text{ }\mu\text{m}$. In der realen Schicht können Lösungsmittelverlust, Reaktion, Dichteunterschiede, Randeffekte und Kristallisation diese Schätzung beeinflussen. Die Berechnung ist keine Geräteformel, sondern eine Kontrolle der Einheit und des Durchflusses.

Das Erhöhen der Dicke durch Vergrößerung des Debyes kann die Stabilität der Meniskusform beeinträchtigen. Der Abstand zwischen Kopf und Substrat, die Benetzungsgrenze, die Streifenbildung und die Ansammlung am Rand werden beobachtet. Die Beschichtung wird nicht nur in der Mitte analysiert; Anfang, stabiler Bereich, Ende und beide Ränder werden separat bewertet. In der kontinuierlichen Produktion können sich im Laufe der Zeit auch das Alter und die Temperatur des Tintenbehälters ändern. Daher repräsentiert eine einzelne, gute Probe nicht die Homogenität einer langen Rolle.

Trocknung und Kristallisation sind getrennte Kontrollpunkte

Der Lösungsmittelverlust eines feuchten Films und die daraus resultierende Umwandlung in die gewünschte Kristallphase sind nicht dasselbe Ereignis. Trocknung mit Gas, Vakuumunterstützung, beheiztes Substrat oder Antisolventierungsmittel führen zu unterschiedlichen Nukleationsverläufen. Eine sehr schnelle Nukleation kann zu einer dichten Nukleationsverteilung führen; jedoch können Benetzung und Defektbildung unterschiedlich beeinflusst werden. Eine sehr langsame Trocknung kann hingegen zu Benetzung, Zusammensetzungszersetzung oder großen, aber unregelmäßigen Körnern führen. Die Verallgemeinerung „Große Körner sind immer gut“ ist daher nicht haltbar.

Zeitabhängige optische Bildgebung, In-situ-Diffraktometrie oder geeignete Spektroskopie können zeigen, in welchem Stadium der Filmbildung die Abweichung beginnt. Allein die Betrachtung des abschließenden XRD-Musters erklärt nicht den Weg der transienten Zwischenphasen. Filme, die die gleiche endgültige Kristallphase durch zwei unterschiedliche Trocknungsprozesse erreichen, können unterschiedliche Restspannungen oder eine unterschiedliche Grenzflächenqualität aufweisen. Die Prozessentwicklung sollte diese Vorgeschichte dokumentieren.

Vakuumabscheidung und Hybridverfahren

Die Studie von Liu, Johnston und Snaith aus dem Jahr 2013 ist eines der frühen Beispiele, das zeigt, dass planare Perowskit-Bauelemente, die durch Dampfabscheidung hergestellt werden, eine hohe Leistung erzielen können. [D12] Bei der gleichzeitigen Abscheidung aus mehreren Quellen sind die Flussraten der Quellen und die Stöchiometrie wichtig; bei der sequenziellen Abscheidung sind hingegen die Umwandlungstiefe und die Reaktionsintegrität der Schichten von Bedeutung. Die vom Quarzkristallmonitor gemessene Rate gibt möglicherweise nicht direkt die Abscheidungsrate aller chemischen Spezies auf dem eigentlichen Substrat an.

Hybride Verfahren, die Vakuum- und Lösungsverfahren kombinieren, wurden beim Beschichten strukturierter Substrate eingesetzt. Der Vorteil eines solchen Verfahrens

besteht darin, dass verschiedene Schichten mit unterschiedlichen, leistungsstarken Methoden aufgebracht werden können; der Nachteil ist jedoch ein höherer Aufwand für den Materialtransport, die Grenzflächenbildung und die Prozessanpassung. Einfache Vergleiche wie „Vakuum ist teuer, Lösung ist günstig“ berücksichtigen nicht den Materialverbrauchsgrad, die Ausbeute, die Wartung und die Kosten für die Verkapselung.

Die Grenzflächenoperation kausal untersuchen

In der Studie von Park und Kollegen aus dem Jahr 2023 werden die Abdeckung und die Grenzflächenverluste einer selbstorganisierten molekularen Schicht auf texturierten Substraten untersucht. Der Ansatz, die Molekülaggregation durch die Verwendung eines Co-Adsorbens zu reduzieren, stellt eine mechanistische Verbindung zwischen der Oberflächenchemie und den elektrischen Verlusten her. [D11] Eine methodische Lehre, die ein Forscher daraus ziehen kann, ist, dass der Grenzflächenprozess nicht nur anhand des Endergebnisses, sondern auch anhand der Oberflächenverteilung und unabhängiger optoelektronischer Messungen untersucht werden sollte.

Für ein neues Passivierungsmolekül werden mindestens vier Vergleichsstudien in Betracht gezogen: unbehandelte Kontrolle, Kontrolle nur mit Lösungsmittel, das Zielmolekül und, falls möglich, ein ähnliches Molekül aus derselben chemischen Familie, das nicht die erwartete Funktion aufweist. Wenn sich die Absorption, die Filmdicke und die Morphologie ändern, wird es schwierig, die PL-Zunahme allein auf die Reduzierung von Defekten zurückzuführen. Die absolute PL-Quantenausbeute wird zusammen mit der stabilen Leistung des fertigen Bauelements unter den gleichen Anregungs- und optischen Erfassungsbedingungen interpretiert.

Alle Schichten skalierbar gestalten

Es ist nicht ausreichend, den Absorber über eine große Fläche aufzutragen. Die untere selektive Schicht, die obere Transportschicht, die Elektrode und die Verbindung müssen ebenfalls mit geeigneter Geschwindigkeit und Fläche hergestellt werden. Die Studie von Weerasinghe und Kollegen aus dem Jahr 2024 ist ein Beispiel für eine Forschung, die die gesamte Prozesskette an eine Roll-to-Roll-Produktion anpasst; das berichtete Modul mit einer aktiven Fläche von etwa 50 cm² erreicht einen Wirkungsgrad von 11 %. Dieser Wert gehört nicht zur gleichen Kategorie wie kleine Zellrekorde. [D33]

Aufgabe: Für ein Bauelement, das von der Spin-Beschichtung zum Slot-Die-Verfahren übertragen werden soll, werden die Variablen in drei Gruppen unterteilt: chemische Zusammensetzung, Fluss/Trocknung und Grenzfläche. Schreiben Sie für jede Gruppe auf, welche Parameter konstant gehalten werden, welche Zwischenergebnisse

gemessen werden und welche Gründe für das Aussortieren fehlerhafter Filme vorliegen. Das erste Ziel ist es, anstelle einer einzelnen Zelle mit höchster Leistung ein homogenes und reproduzierbares Filmbereich zu erzielen.

Wie verknüpfen wir den Abscheidungsfluss im Vakuum mit einer optischen Karte?

Beim Vakuumaufdampfen ist der **Fluss** die Menge an Teilchen, die pro Zeiteinheit auf eine Flächeneinheit trifft. Nicht jedes auf die Oberfläche auftreffende Teilchen wird dauerhaft in den Film eingebaut: Adhäsion, Re-Verdampfung und Oberflächenreaktionen sind ebenfalls von Bedeutung. Da die Substrattemperatur diese Prozesse beeinflussen kann, garantiert allein die Angleichung der nominalen Aufdampfgeschwindigkeit der Quellen nicht die gleiche Zusammensetzung. Mit der Änderung von Material und Verfahren ändert sich auch die geeignete Kontrolle; es gibt keine einzige universelle Temperaturvorgabe.

Eine **optische Karte** zeigt beispielsweise die räumliche Verteilung, indem das Absorptions- oder Lumineszenzsignal an verschiedenen Positionen des Films gemessen wird. Dass die Karte ein gleichmäßiges Bild zeigt, bedeutet nicht, dass die elektrische Leistung oder die Stabilität gemessen wurde. Unter den gleichen optischen Bedingungen werden die Homogenitätsprüfung, die stabile Leistungsmessung des fertigen Bauelements und die Veränderung im Laufe der Zeit kombiniert. So kann untersucht werden, in welcher Phase des Prozesses zwischen Tinte, Film und funktionierender Zelle Verluste entstehen.

Tandem-Entwicklung: Die Kombination von zwei hochwertigen Zellen zu einem hochwertigen Produkt

Die Entwicklung von Tandemzellen bedeutet nicht einfach, zwei fertige Zellen zusammenzufügen

Eine Tandem-Solarzelle teilt das Licht zwischen zwei Absorbern: Die obere Zelle nutzt einen Teil der hochenergetischen Photonen, die untere Zelle nutzt das durchgelassene Licht. **2T** ist eine in Reihe geschaltete Konfiguration mit zwei äußeren Anschlüssen; **4T** ist eine Konfiguration, bei der die Anschlüsse jeder Unterzelle separat verwendet werden. In der 2T-Konfiguration fließt der gleiche Strom durch beide Zellen, und die Spannungen addieren sich bei diesem Strom. In der 4T-Konfiguration können die Leistungen an separaten Betriebspunkten erfasst werden. In beiden Fällen wurde das Licht, das auf die untere Zelle trifft, durch die obere Schicht verändert.

Das **gefilterte Spektrum** ist die verbleibende Wellenlängenverteilung, nachdem sie die oberen Schichten durchlaufen hat. Die direkte Messung der Leistung der unteren Zelle in der Sonne und das Addieren dieser Leistung zur Leistung der oberen Zelle ergibt kein korrektes Ergebnis. **Stromabgleich** bedeutet, die nutzbaren Ströme von in Reihe geschalteten Unterzellen aneinander anzupassen; dies hängt jedoch nicht nur von der Bandlücke ab, sondern auch von der Dicke, der Reflexion und der parasitären Absorption.

Integrationsbudgets

Das **thermische Budget** beschreibt den Temperatur-Zeit-Verlauf, dem die darunterliegenden Schichten in nachfolgenden Verarbeitungsschritten ausgesetzt sind. Die **chemische Kompatibilität** gibt an, ob ein Lösungsmittel oder Reagenz die vorherige Schicht angreift oder nicht. Die **topografische Anpassung** bezieht sich darauf, ob die obere Schicht die texturierte Oberfläche ohne Pinholes und mit ausreichender Dicke bedecken kann. Wenn diese Budgets überschritten werden, kann selbst eine ansonsten erfolgreiche Rezeptur für die obere Zelle in einer Tandemzelle zu einem Fehlschlag führen.

Synthetischer Vergleich: Vor der oberen Verarbeitung beträgt das diagnostische Kriterium der unteren Zelle 100 Einheiten, bei alleiniger Anwendung des Lösungsmittels 98 und nach vollständiger thermischer Behandlung 90. Bevor der

Verlust in der abschließenden Tandemstruktur direkt mit der Zusammensetzung des oberen Absorbers in Verbindung gebracht wird, stellt sich die Möglichkeit von thermischen Schäden heraus. Dieses Experiment berechnet nicht die tatsächliche Tandemleistung, sondern zeigt, welchen Einfluss die einzelnen Verarbeitungsschritte haben. In einer realen Anwendung sollten die Kontrollproben die gleiche Zeit und die gleichen Umgebungsbedingungen aufweisen.

Biasbeleuchtung ist die Einstellung des Zustands einer Teilzelle in einer Mehrfachübergangsmessung durch selektiertes Licht. **Elektrische Vorspannung** ist ein von außen angelegter Spannungszustand. Diese können erforderlich sein, um die spektrale Reaktion der Teilzellen zu differenzieren. Eine Lichtanpassung, die für einen einzelnen Übergang ausreichend ist, kann möglicherweise nicht beide Teilzellen eines Tandem-Systems gleichzeitig in den richtigen Zustand versetzen. Daher wird bei der Entwicklung von Tandemzellen die Messeinrichtung so konzipiert, dass sie ein integraler Bestandteil der Architektur ist.

Verständniskontrolle: Niedriger Strom in der unteren Zelle

Berechnen Sie zunächst, wie viel Strom die Zelle unter den erwarteten gefilterten Lichtbedingungen liefern sollte. Überprüfen Sie anschließend separat, ob durch den vorherigen Prozess Materialschäden entstanden sind. Das Fehlen von Photonen und das Sammeln von weniger Ladungsträgern durch die gleichen Photonen sind unterschiedliche Probleme und erfordern unterschiedliche Reparaturmaßnahmen.

Unterschiede bei der Integration von 2T- und 4T-Tandemzellen.

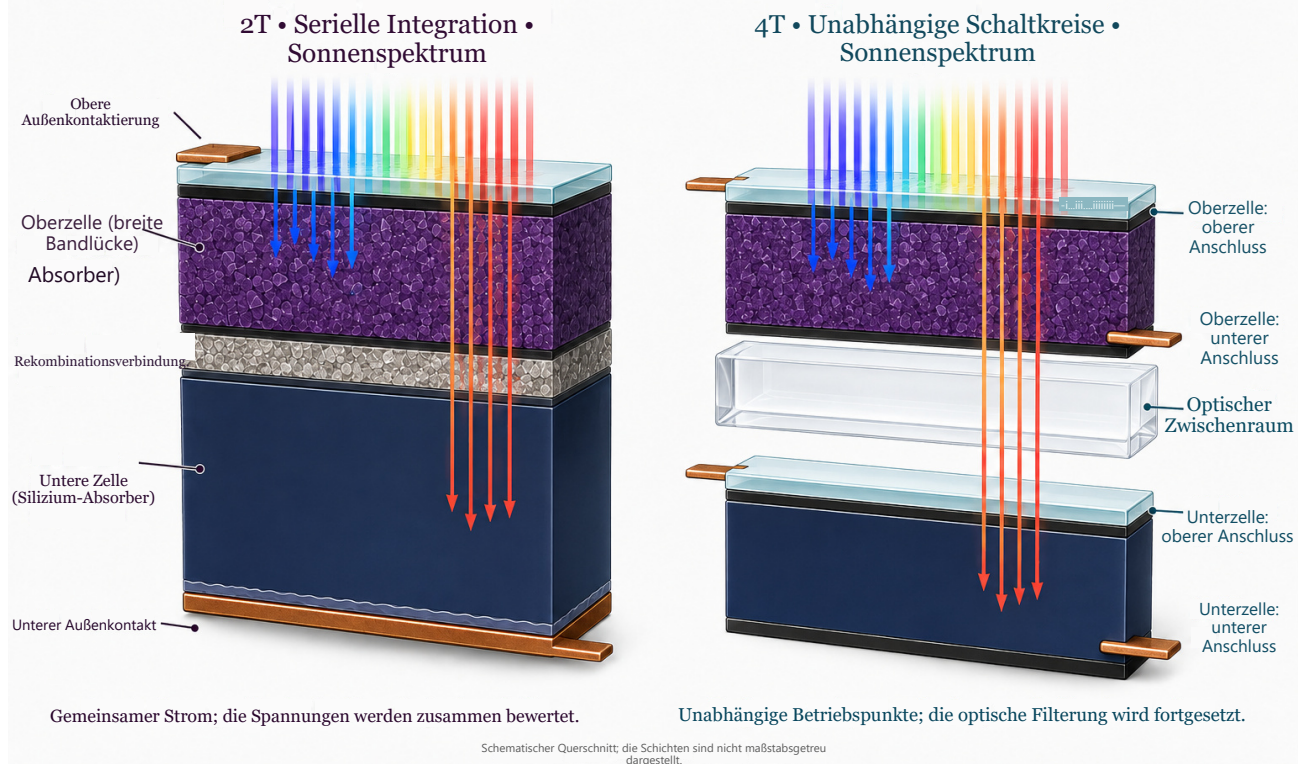


Abbildung 06. In der 2T-Struktur sind die Teilzellen elektrisch in Reihe geschaltet; in der 4T-Struktur gibt es zwei unabhängige Betriebspunkte. In beiden Architekturen beeinflusst die optische Filterung der oberen Zelle die untere Zelle. Das Schaltbild zeigt die Verbindungstopologie. [D34] [D19] Mit einem Bildgenerierungswerkzeug erstellte konzeptionelle Illustration; keine Messaufnahme.

Eine Tandem-Solarzelle summiert nicht automatisch die Leistungen von zwei unabhängigen Zellen. Die obere Zelle verändert das Spektrum, das auf die untere Zelle trifft. Die gemeinsame Verbindung muss sowohl optische Transmission als auch elektrische Rekombination ermöglichen. Die Beschichtungs-, Temper- und Elektrodenprozesse der oberen Zelle können die Oberfläche der unteren Zelle beeinflussen. Das Ergebnis ist ein Bauelement, das sich von der Summe zweier separater Laborrekorde unterscheidet. Die Entwicklung konzentriert sich auf die Bewältigung dieser Abhängigkeiten.

Die Auswahl zwischen 2T und 4T in der praktischen Anwendung

In einer monolithischen Zwei-Kontakt-Struktur arbeiten die Unterzellen elektrisch in Reihe. In einem Vier-Kontakt-Optikstapel können zwei Unterzellen in getrennten Schaltkreisen an ihren jeweiligen Punkten maximaler Leistung betrieben werden. 2T kann weniger unabhängige elektrische Ausgänge und bei geeigneter Auslegung weniger Zwischen-Optikschichten bieten; im Gegenzug erfordert es jedoch eine Stromanpassung und eine direkte Prozessintegration. 4T bietet eine größere Flexibilität bei der unabhängigen elektrischen Ansteuerung; zusätzliche transparente Elektroden, Verbindungen, Flächennutzung und Leistungselektronik müssen berücksichtigt werden.

$$P_{2T} = \max_I I [V_{\text{top}}(I) + V_{\text{bottom}}(I)], \quad P_{4T} = P_{\text{top,mpp}} + P_{\text{bottom,mpp}}. \quad (\text{II.8.1})$$

Wenn die gleichen optischen Bedingungen herrschen und die gleichen Unterzellenkurven verglichen werden, darf die Summe der einzelnen Maxima nicht kleiner sein als die Leistung, die bei Betrieb mit einem gemeinsamen Strom erzielt wird. Reale 2T- und 4T-Bauelemente haben jedoch nicht die gleichen optischen Eigenschaften und die gleichen Verluste. Es ist weder korrekt, diese mathematische Ungleichung als automatische Überlegenheit von 4T-Bauelementen gegenüber realen Produkten zu interpretieren, noch eine universelle Überlegenheit von 2T-Bauelementen aus einer einzigen Leistungstabelle abzuleiten. Der architektonische Vergleich erfolgt mit gepaarten Annahmen.

Die Unterzelle unter dem richtigen Spektrum bewerten

Der unter der Silizium-Unterzelle unter Standard-Vollspektrum gemessene Strom ist nicht der Strom der Tandemzelle. Die Photonen, die die Oberzelle und die Zwischenschichten passieren, bestimmen die Erzeugung in der Unterzelle. Daher wird bei der Bestimmung der EQE der Unterzelle die Transmission der oberen Schicht und die parasitäre Absorption berücksichtigt. Im optischen Modell muss analysiert werden, in welcher Schicht die Absorption stattfindet; obwohl die Lichtabsorption der gesamten Schicht hoch ist, kann ein Teil dieses Lichts in der leitfähigen Oxidschicht oder der Transportschicht verloren gehen.

Bei der Dickenvariation kann der Strom der oberen Zelle ansteigen, während der Strom der unteren Zelle abnehmen kann. Das Ziel für 2T ist nicht nur, die Ströme im Standard-Spektrum vollständig auszugleichen. Wenn die Temperatur und die sich im Laufe des Jahres ändernden Spektren berücksichtigt werden, kann ein etwas anderes Design eine höhere jährliche Energieausbeute liefern. Dieses Ergebnis hängt von den Annahmen über den Standort und das Klima ab. Die Simulationsausgabe sollte

angeben, mit welchen meteorologischen Daten, mit welchem spektralen Modell und mit welcher Modultemperatur sie berechnet wurde.

Beschichtung auf texturiertem Silizium

Die strukturierte Oberfläche unterstützt die Lichtlenkung und erzeugt gleichzeitig Höhenunterschiede und Eckgeometrien für die obere Schicht. Wenn die Schicht an den Spitzen dünner wird oder sich in den Tälern ansammelt, können lokale Leckströme und Unterschiede in der Ladungsträgerbewegung entstehen. Ein Querschnittsbild, das nur von einer Position aufgenommen wird, repräsentiert nicht die gesamte Waferabdeckung. Es werden Proben zwischen den Spitzen, Tälern, dem Zentrum und den Rändern entnommen; die elektrischen Karten werden zusammen mit der Morphologie bewertet.

Die Studie von Sahli und Kollegen aus dem Jahr 2018 ist ein frühes Beispiel für einen hybriden Herstellungsprozess für monolithische Perowskit/Silizium-Tandemzellen auf vollständig texturiertem Silizium. [D34] Diese bahnbrechende Studie ist wichtig, da sie zeigt, dass eine gute Lichteinfangrate auch ohne die Notwendigkeit einer Planarisierung erreicht werden kann. Sie impliziert nicht, dass ein bestimmtes hybrides Rezept direkt auf jede Textur und jede Zusammensetzung übertragen werden kann. Die Auswahl des modernen Prozesses wird in der jeweiligen Wafer- und Oberzellstruktur erneut validiert.

Die Verbindung ist kein Kabel

In einer monolithischen Tandemzelle muss die Zwischenverbindung die Elektronen einer Unterzelle mit den Löchern der anderen Zelle mit geringen Verlusten verbinden. Optische Durchlässigkeit, elektrischer Kontakt, Oberflächenpassivierung und chemische Kompatibilität sind gleichzeitig erforderlich. Eine zusätzliche absorbierende oder barrierebildende Zwischenschicht kann eine gute obere und untere Zelle in eine Tandemzelle mit niedrigem Füllfaktor (FF) verwandeln. Es ist nützlich, das Bandabstandsprofil der Grenzfläche zu skizzieren; es sollte jedoch beachtet werden, dass die tatsächlichen Arbeitsfunktionen, Grenzflächen-Dipole und Defektzustände nicht allein aus den in der Literatur angegebenen Werten für die blanke Oberfläche bekannt sind.

Bei der Entwicklung von Interkonnektionen werden einfache Testanordnungen verwendet. Es werden Fragen gestellt wie: Ist die Strom-Spannungs-Kennlinie linear, gibt es eine temperaturabhängige Barriere, verändern nachfolgende Prozesse den Widerstand? Allerdings ist der Zwei-Punkt-Widerstand der Testanordnung nicht gleichwertig mit allen Transport- und Rekombinationsprozessen in einem echten Tandem-Bauelement. Die endgültige Entscheidung wird durch die stabile Leistung, die

spektrale Charakteristik und das Temperaturverhalten des vollständigen Bauelements untermauert.

Thermisches und chemisches Budget

Eine Unterzelle wird nach Abschluss ihrer Herstellung zusätzlichen Temperaturen, Lösungsmitteln, Plasma und mechanischem Kontakt ausgesetzt. Für jeden einzelnen Schichtprozess werden die auf die Unterzelle ausgeübten Belastungen aufgeführt. Ein einziger maximaler Temperaturschwellenwert beschreibt nicht die gesamte Kompatibilität; Dauer, Atmosphäre und Reihenfolge sind von Bedeutung. Selbst ein Plasma bei niedriger Temperatur kann durch energiereiche Teilchen Schäden verursachen. Ein chemisch gesehen „mildes“ Lösungsmittel kann die darunter liegende molekulare Schicht auflösen oder neu anordnen.

Die einfachste Integrationskontrolle führt die untere Zelle durch die gesamte Prozessfolge der oberen Zelle, lässt den aktiven oberen Absorber jedoch weg. Die untere Zelle wird vor und nach dieser Prozessfolge gemessen. Diese „Leerprozess“-Kontrolle trennt Verluste durch optische Filterung von Prozessschäden. Derselbe Ansatz gilt für die obere Zelle: Vergleichen Sie die einfachen Schichtstapel vor und nach der abschließenden Beschichtung mit der transparenten Elektrode. Wird eine schützende Pufferschicht hinzugefügt, werden auch ihre optischen Verluste und ihr zusätzlicher Widerstand gemessen.

Das Spannungsproblem der oberen Zelle mit breiter Bandlücke

Die Vergrößerung der Bandlücke erhöht das theoretische Spannungspotenzial der oberen Zelle; die tatsächliche Leerlaufspannung steigt möglicherweise nicht im gleichen Verhältnis. Die Rekombination an der Grenzfläche, die Zusammensetzungszerlegung und die Anreicherung von Ladungsträgern werden untersucht. Die Verschiebung des PL-Peaks unter Lichteinwirkung beweist nicht allein, dass das gesamte Bauelement auf die gleiche Bandlücke übergegangen ist; die räumliche und zeitliche Empfindlichkeit der Messung wird bewertet. Die reversible Veränderung, die durch kurzzeitige Beleuchtung verursacht wird, wird von der dauerhaften Verschlechterung unterschieden.

In dem Entwicklungsexperiment wird die Einzelzellen-Referenz der oberen Zelle beibehalten. Wenn die gleiche obere Struktur mit der unteren Zelle kombiniert wird und eine niedrigere Spannung liefert, werden die Verbindungsstellen oder die Prozessintegration untersucht. Wenn auch die Einzelzellen-Referenz eine niedrige Spannung aufweist, werden zunächst die Chemie und die Grenzflächen der oberen Zelle untersucht. Auf diese Weise wird nicht versucht, jeden Verlust innerhalb des

Tandem-Aufbaus nur anhand der Gesamtspannung des gesamten Bauelements zu schätzen.

Unabhängige spektrale Kontrolle bei Tandemmessungen

Dass ein Simulator für eine einzelne Übergangsschicht-Siliziumzelle geeignet ist, bedeutet nicht zwangsläufig, dass er auch die beiden Unterschichten einer Tandemzelle korrekt simulieren kann. Es sind EQE-Messungen erforderlich, die die spektralen Eigenschaften und die Lichtvorspannung der Unterschichten berücksichtigen. Der Anwendungsbereich von IEC 60904-1-1 behandelt dieses Problem der Mehrfachübergangsmessung direkt. [D19] In dem Forschungsbericht sollten die Ströme der Unterschichten, die spektrale Abstimmung, die Fläche und die Methode der stationären Leistungsbestimmung klar dargelegt werden.

Wenn während der Messung ionische Prozesse aktiv sind, wird auch die zeitliche Veränderung des Punktes des maximalen Stroms berücksichtigt. Die Licht- und Spannungsverläufe vor der Messung werden aufgezeichnet. Das Erreichen eines hohen Füllfaktors (FF) bei einer Messung garantiert nicht, dass bei einem kontinuierlichen Betrieb im MPP-Punkt die gleiche Leistung erzielt wird. Wenn sich die Ergebnisse ändern, wenn die Reihenfolge der Messungen an demselben Bauelement geändert wird, sollte zunächst das Messprotokoll und das dynamische Verhalten verstanden werden.

Übergang von der Zelle zum Modul

Das Schneiden von Tandemzellen kann neue Kantenflächen erzeugen. Die Verbindungstemperatur, die Zusammensetzung des Verkapselungsmaterials und die Laminationsspannung können die obere Zelle beeinflussen. Das Mini-Modul ist daher nicht nur ein Demonstrationsmittel, sondern auch ein Integrationsversuch. Die Leistung derselben Zellengruppe wird vor, nach der Verbindung und nach der Laminierung verglichen. Die optischen Verstärkungen und die elektrischen Verluste innerhalb des Moduls werden getrennt betrachtet.

Entwicklungsschritt	Referenz	Zu messender kritischer Unterschied
Prozesshistorie der Oberzelle auf die Unterzelle anwenden	Nicht bearbeitete Unterzelle	Spannung, Lebensdauer und Oberflächenverluste.
Die obere Zelle auf eine strukturierte Oberfläche übertragen.	Oberzelle auf einem ebenen Substrat	Bedeckung, Leckstrom, räumliche Verteilung

Entwicklungsschritt	Referenz	Zu messender kritischer Unterschied
Änderung der Verbindungsschicht	Unveränderter Stapel aus Ober- und Unterzelle	FF und temperaturabhängiger Transport.
Transparente Elektrodenbeschichtung	Halbstapel vor der Beschichtung.	Plasmaschäden und parasitäre Absorption.
Mini-Modul-Laminierung	Anfängliche Summenleistung derselben Zellen	Leistungsübertragung und Schadenskarte.

Die verschiedenen Evidenzstufen gemeinsam betrachten

Die Ankündigung von Oxford PV bezüglich der ersten kommerziellen Auslieferungen im Jahr 2024, die Ankündigung von Qcells bezüglich der Stresstests für die Pilotlinienmodule im Jahr 2025 und die Ankündigung von GCL bezüglich der Produktionsstätte im Jahr 2025 sind unterschiedliche Arten von Belegen. [C10] [C11] [C12] Die eine bezieht sich auf die Auslieferung, die andere auf einen bestimmten Testumfang und die dritte auf die Phase der Anlage. Keine dieser Ankündigungen beweist allein, dass alle Tandemtechnologien die gleiche Kosten- und Lebensdauer im Feld erreichen. Das Unternehmensverzeichnis bewahrt diese Unterscheidungen besonders.

Übungsaufgabe. Erstellen Sie für ein 2T-Tandem-Bauelement drei separate Fehlerbudgets: optisch, elektrisch und prozessbezogene Anpassung. Fügen Sie zu jedem Budget einen Schnelltest, eine vollständige Bauelementvalidierung und eine mögliche Fehlinterpretation hinzu. Erläutern Sie, auf welchen zwei Arten ein Eingriff, der den Strom der oberen Zelle erhöht, die Gesamtleistung reduzieren kann.

Weitere Entwicklungsmöglichkeiten: CdTe, CIGS, III-V-Halbleiter und Lösungstechnologien

Alternative Verfahren anhand gemeinsamer Funktionen vergleichen

CdTe-, CIGS-, III-V-, organische, farbstoffsensibilisierte und Quantenpunkt-Solarzellen sind nicht einfach verschiedene Bezeichnungen für dieselbe Herstellungstechnik. In allen Fällen sind Lichtabsorption, Ladungstrennung, -transport und -sammlung erforderlich; jedoch findet jeder dieser Prozesse in einem anderen Material statt. Beim Erlernen einer Methode ist es hilfreich, zunächst die Funktion der einzelnen Schichten zu skizzieren, um Verwirrung zwischen den chemischen und Gerätebezeichnungen zu vermeiden.

CdTe ist Cadmiumtellurid. **CdSeTe** bezeichnet eine Legierungsfamilie, der auch Selen beigemischt wird. Behandlungen nach dem Schichtwachstum können die Korngröße und die Defektstruktur verändern. **CIGS** ist die $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ -Familie; das Verhältnis von Indium und Gallium kann über die Tiefe der Schicht variiert werden. Dieser **Zusammensetzungsgradient** ist möglicherweise nicht durch eine einfache chemische Analyse zu erkennen. Die Tiefeninformation ist aufgrund der Auswirkungen auf das elektrische Feld und das Bandkantenprofil von Bedeutung.

In **III-V**-Zellen bedeutet **Epitaxie**, dass die neue kristalline Schicht die darunterliegende Kristallstruktur übernimmt. **MOCVD** ist ein Verfahren zur chemischen Gasphasenabscheidung, bei dem metallorganische Vorläufer verwendet werden; **MBE** ist das Verfahren der Molekularstrahlepitaxie. Beide Verfahren zielen auf ein kontrolliertes Wachstum ab; die Ausrüstung, die Wachstumsrate und die Materialflusskontrolle sind jedoch unterschiedlich. Die Gitteranpassung, die Defektbildung und die Kosten des Substrats spielen bei der Auswahl eine Rolle.

Abstand zur Grenzfläche in lösungsverarbeitbaren Systemen

In einer organischen Zelle führt Licht hauptsächlich zu einer gebundenen Elektronen-Loch-Anregung, d. h. zur Bildung eines **Exzitons**. Die Donator-Akzeptor-**Grenzfläche** hilft bei der Trennung; anschließend müssen die getrennten Ladungen einen kontinuierlichen Transportweg finden. In einer farbstoffsensibilisierten Zelle absorbiert der Farbstoff das Licht, das Elektron wird auf einen anderen Halbleiter übertragen und der Ladungszustand des Farbstoffs wird wiederhergestellt. In einem Quantenpunktfilm beeinflussen die Oberflächenmoleküle der kleinen Halbleiterpartikel, d. h. die **Liganden**, sowohl die Mischstabilität als auch die elektrische Verbindung.

Synthetischer Verfahrensvergleich: Verfahren A liefert eine höhere Leistung, wobei jedoch nur 50 von 100 Proben akzeptiert werden, während Verfahren B eine etwas geringere Leistung liefert, aber 90 von 100 Proben akzeptiert. Es ist noch nicht bekannt, welches Verfahren kostengünstiger ist; dabei sind auch Energie-, Material-, Prozesszeit- und Geräteaufwand zu berücksichtigen. Die gleiche Logik gilt für alle Technologiegruppen. Wir werden die folgenden Verfahren nicht nur anhand ihrer Rekordwerte, sondern auch anhand der kontrollierten Variablen und der Kosten pro gutem Produkt betrachten.

Verständniskontrolle: Was lässt sich von einer Materialfamilie auf eine andere übertragen?

Die Messmethodik und die Verlustbilanz lassen sich meist auf andere Bauelemente übertragen. Die Verwendung desselben Lösungsmittels, derselben Temperatur oder dieselben Defektinterpretationen lassen sich jedoch nicht automatisch übertragen. In der neuen Bauelementfamilie muss neu ermittelt werden, welcher Ladungsträgerzustand, welche Grenzfläche und welches chemische Gleichgewicht kritisch sind.

Eine Produktionsmethode wird nicht nur aufgrund des höchsten Zellwirkungsgrads ausgewählt. Das zu verwendende Substrat, die Fläche, das Gewicht, die Lichtverhältnisse, der Temperaturbereich, die Materialverfügbarkeit und die Produktlebensdauer beeinflussen die Auswahl. In diesem Abschnitt werden die in dem ersten Buch behandelte Materialphysik in Prozessstabilität umgewandelt. Für jede Technologie sollte zunächst ein funktionierender Referenzprozess etabliert und anschließend die Änderungen an Absorber, Grenzfläche und Verpackung analysiert werden. Die Tatsache, dass in einer Tabelle Rekordwerte aus verschiedenen Technologien aufgeführt sind, bedeutet nicht, dass diese die gleiche Produktanforderung erfüllen.

CdTe und CdSeTe: die Chemie nach dem Wachstum

In einem typischen Aufwuchsprozess für Dünnschichten auf Glasbasis werden eine transparente, leitfähige Vorelektrode, eine geeignete Fensterschicht oder Pufferschicht, ein Absorber und ein Rückkontakt verwendet. Die Schichtreihenfolge und -zusammensetzung variieren je nach Hersteller. Der Absorber, der durch Nahabstandssublimation, Dampftransport oder andere Beschichtungsverfahren aufgebracht wird, kann nicht unabhängig von den nachfolgenden Aktivierungs- und Dotierungsprozessen betrachtet werden. Eine alleinige Erhöhung der Filmschichtdicke führt nicht zwangsläufig zu einer besseren Ladungsträgersammlung; die Lebensdauer der Ladungsträger, das elektrische Feld, die Korngrenzenchemie und der Rückkontakt sind zusammen entscheidend.

Bei der Entwicklung von CdTe werden vier verschiedene Fragen gestellt. Die erste Frage betrifft die Kontinuität und Struktur des wachsenden Films. Die zweite Frage bezieht sich darauf, wie sich Defekte und Korngrenzen nach der Aktivierung verändern. Die dritte Frage lautet, mit welcher Dotierung und welchen thermischen Prozessen die gewünschte Ladungsträgerkonzentration erreicht wird. Die vierte Frage ist, ob der Rückkontakt die Ladungsträger mit geringen Verlusten sammelt und während des Alterungsprozesses stabil bleibt. Das Zusammenfassen dieser Fragen in einem einzigen Wirkungsgradwert erschwert die Prozessdiagnose.

Die 2025 veröffentlichte CdSeTe-Studie von Kuciauskas und seinen Kollegen ist ein gutes Beispiel für einen solchen Mechanismus: Die Phosphor-Dotierung wurde unter den in der Studie beschriebenen spezifischen Bedingungen mit einer durch Anionenleerstellen verursachten Unordnung in Verbindung gebracht; die Leistung des Bauelements stieg von 19,3 % auf 20,2 %. Das in dem Artikel diskutierte 25 % ist ein Modellpotenzial und sollte nicht mit dem gemessenen 20,2 % verwechselt werden. Dieses Ergebnis bedeutet nicht, dass Phosphor in jeder CdTe-Schicht den gleichen Effekt erzielt. [\[D36\]](#)

Vorgeschlagenes Experiment. Kreuzen Sie Aktivierungs- und Dotierungsbedingungen an Proben aus derselben Wachstumscharge. Prüfen Sie Dicke und Zusammensetzung; fertigen Sie neben vollständigen Zellen auch Proben für die optische und elektrische Charakterisierung. Eine steigende Spannung bei unveränderter langwelliger EQE weist auf eine andere Erklärung hin als eine Zunahme sowohl der Spannung als auch der Sammlung. Prüfen Sie eine Änderung des Rückkontakts in einem getrennten Versuchszweig. Sinkt die Lebensdauer bei steigender Ladungsträgerdichte, ist deren alleinige Maximierung nicht das richtige Ziel. Das geschlossene Materialmanagement in Kadmium-haltigen Prozessen, die Einhaltung angemessener industrieller Hygienestandards und die Entwicklung von Prozessen zur Abfallrückgewinnung sind wesentliche Bestandteile. Die hier beschriebene Methode ersetzt nicht die chemischen Betriebsanweisungen der Anlage. Die

Materialverwendung sollte nicht nur anhand der Masse pro Zelle, sondern auch anhand des angestrebten Nutzungsgrades und des zurückgewonnenen Materials verfolgt werden.

CIGS: von der mittleren Zusammensetzung zum Tiefenprofil

Für CIGS sind die Co-Evaporations- und die Metallvorläufer-Methoden, bei denen Selenisierung oder Sulfidierung angewendet wird, unterschiedliche Prozessfamilien. Auch wenn das durchschnittliche Verhältnis von Cu, In und Ga gleich ist, können sich das Profil über die Filmdicke, die Oberflächenzusammensetzung, die Korngröße und die Alkaliverteilung unterscheiden. Daher kann eine einzelne Oberflächenmessung nicht als repräsentativ für den gesamten Absorber angesehen werden.

Gesamtzusammensetzungsmessungen wie XRF werden durch eine geeignete Tiefenanalyse und eine Querschnittsuntersuchung ergänzt.

In der Studie von Keller und Kollegen aus dem Jahr 2024 sind die zertifizierten 23,64 %-Ergebnisse auf einer Kombination von gezielt entwickelten Maßnahmen aufgebaut, darunter die Silberlegierung, eine starke Zunahme von Ga in der Nähe des Rückkontakts und eine Nachbehandlung mit RbF. Die Forscher hatten das Ziel, die Bandlückenfluktuationen in lateraler und vertikaler Richtung zu reduzieren. Dieses einzelne Beispiel beweist nicht, dass das gleiche Profil für alle CIGS-Bauelemente optimal ist, sondern zeigt, dass der Ausdruck „Zusammensetzung anpassen“ ein räumliches Profildesign darstellt. [\[D37\]](#)

Ändern Sie in einem Entwicklungsablauf zunächst den Puffer bei unveränderter Absorberzusammensetzung; halten Sie anschließend den Puffer konstant und ändern Sie das Absorberprofil. Werden beide Änderungen gleichzeitig vorgenommen, bleibt die Ursache des Spannungsgewinns verborgen. Beeinflussen Lichtlagerung und vorherige Spannungsbedingungen das Ergebnis, muss die Konditionierung vor der Messung standardisiert werden. Speichern Sie die Anfangsmessungen und die Messungen nach der Konditionierung gemeinsam. Vergleichen Sie außerdem EQE- und Transmissionsmessungen, um optische Verluste der Frontelektrode und des Puffers von Ladungsträgersammelverlusten zu trennen.

III-V: Epitaxie, Gitteranpassung und Produktkategorie

Die Entwicklung von III-V-Zellen umfasst die Auswahl eines geeigneten Substrats, die Kontrolle der Zusammensetzung und Dotierung der epitaktischen Schicht, die gemeinsame Steuerung der Übergangsverbindungen und des optischen Designs. Beim MOVPE/MOCVD-Verfahren reagieren gasförmige Vorläufer auf einer heißen Oberfläche und bilden kristalline Schichten. Temperatur, Flussraten, Druck und die Reaktorgeschichte können nicht nur die Dicke, sondern auch die Zusammensetzung und die Defektbildung beeinflussen. Ein gitterangepasstes Design und ein metamorphes Design, das die Relaxation der Gitterspannung steuert, haben nicht die gleichen Akzeptanzkriterien.

AZUR SPACE gibt in seiner eigenen Produktbeschreibung an, dass auf Germanium-Substraten mittels MOVPE mehrschichtige III-V-Strukturen hergestellt werden. Raumzellenprodukte stellen eine eigene Produktfamilie dar. Die bei AM0-Spektrum und unter bestimmten Strahlungsbedingungen erzielten Ergebnisse lassen sich nicht direkt mit den Ergebnissen von terrestrischen AM1.5G-Modulen vergleichen. [D38]

Verwenden Sie bei der Entwicklung der Epitaxie eine Referenzprobe. Messen Sie die Schichtdicke, die Zusammensetzung und die Kristallqualität; verifizieren Sie anschließend die Teilzellenströme in dem fertigen Bauelement unter geeigneten Vorspannungsbedingungen. Wenn eine Stromdiskrepanz festgestellt wird, bewerten Sie zuerst die spektrale Erzeugung und dann die Sammelverluste. Es ist notwendig, nicht nur die Dunkelcharakteristik, sondern auch das Verhalten des Tunnelübergangs bei der Zielstromdichte zu untersuchen. In konzentrierten Anwendungen gewinnen der Kontaktwiderstand und das thermische Management eine größere Bedeutung. Die Wiederverwendung von Substraten oder die epitaktische Abtragung wird nicht automatisch als Kosteneinsparung in der Kostenkalkulation berücksichtigt. Die Absplitzrate, die Oberflächenerneuerung, die Qualität des nachfolgenden Wachstums, die Anzahl der möglichen Wiederverwendungen und das Risiko von Brüchen müssen gemessen werden. Wenn bei der Reduzierung der Substratkosten die Zelleistung oder die Produktionsausbeute sinkt, kann es zu keiner Netto-Kosteneinsparung kommen.

Organische Photovoltaik: Die gleichzeitige Optimierung von Chemie und Morphologie

In organischen Bauelementen sind nicht nur die Energieniveaus von Donor und Akzeptor, sondern auch die Morphologie der Mischung von Bedeutung. Die Wahl des Lösungsmittels, die Art des Dotierstoffs, die Trocknungsgeschwindigkeit, das Tempern und die Beschichtungsmethode beeinflussen die Phasentrennung und die Transportwege. Von einem guten Rezept für die Herstellung dünner Schichten durch Spin-Coating wird nicht erwartet, dass es direkt in einer Slot-Die- oder Gravieranlage eingesetzt wird. Während des Trocknens der Schicht sind die Lösungsmittelkonzentration und die Temperatur unterschiedlich.

Die 2024 veröffentlichte Studie von Zhang und seinen Kollegen zeigt, dass zur Erzielung hoher Leistung in verschiedenen Lösungsmitteln die Molekülstruktur und die Wechselwirkungen in der Lösung zusammen mit der Morphologie berücksichtigt werden müssen. Die daraus abzuleitende Lehre ist, dass anstatt nach einem einzigen „guten Lösungsmittel“ zu suchen, die Lösungsmittelabhängigkeit als Designparameter betrachtet werden sollte. [D39]

In der vorgeschlagenen Kontrollsequenz werden die Tintenalterung, der Feststoffgehalt und die Filmdicke konstant gehalten; lediglich die Trocknung oder das Tempern wird verändert. Absorption und Streuung, morphologieabhängige Messungen, Transportmessungen und die vollständige Zelleistung werden gemeinsam verwendet. Wenn in einem dicken Film die Leerlaufspannung (FF) abnimmt, werden zunächst die Transport- und Serienwiderstandseffekte getrennt betrachtet. Bei einer Anwendung in Innenräumen ist der Lux-Wert allein nicht die Eingangsleistung; das Spektrum der Lichtquelle und die radiometrische Leistungsdichte werden angegeben. Die Leistung in Außenumgebungen und die Leistung bei schwachem Licht werden nicht in dieselbe Kategorie eingeordnet.

Der Produktionsansatz von Heliatek ist ein Beispiel für die kontinuierliche Abscheidung von kleinen, organischen Molekülschichten auf einem flexiblen Substrat im Vakuum. Dies zeigt, dass die Vorstellung, dass alle organischen PV-Zellen durch Lösungsmittelverfahren aufgedruckt werden, falsch ist. Die Produkt- und Produktionserklärungen des Unternehmens sind im Unternehmensprofil dokumentiert. [C14]

Farbstoffsensibilisierte Solarzellen: Abstimmung der Komponenten

Bei der Entwicklung von DSSC arbeiten eine poröse Halbleiterelektrode, ein auf die Oberfläche aufgebrachtes Farbstoffmolekül, eine Umgebung für die Ladungserneuerung und eine Gegenelektrode zusammen. Die Erhöhung der Oberfläche, um mehr Farbstoffmoleküle zu binden, ist nicht ausreichend, wenn die Elektronenleitung oder der Elektrolytzugang beeinträchtigt werden. Der Photostrom hängt nicht nur von der Farbstoffabsorption ab, sondern auch von der Injektion, der Farbstofferneuerung und der konkurrierenden Rekombination. Der in dem ersten Buch beschriebene grundlegende Mechanismus wird hier in Entscheidungen über die Elektrodenherstellung und die Zellversiegelung umgesetzt.

In dem Experiment wird zunächst die Elektrodenstärke und die Porenstruktur konstant gehalten, während die Adsorptionsdauer des Farbstoffs separat variiert wird. Beim Vergleich des neuen Farbstoffs wird die aufgetragene Menge und das Spektrum dokumentiert. Wenn sich die Leerlaufspannung nach dem Wechsel des Elektrolyten erhöht, sollte man sich nicht ausschließlich auf die Erklärung beschränken, dass dies auf die Energieniveaus des Farbstoffs zurückzuführen ist; auch das Grenzflächenpotenzial und die Rekombination könnten sich verändert haben. Die Dichtigkeit, der Lösungsmittelverlust und die photochemische Umwandlung werden unter den Anwendungsbedingungen geprüft.

Quantenpunkte: Der Preis des Ligandenaustauschs

Kolloidale Quantenpunkte können in Lösung durch lange Liganden stabilisiert werden; die gleiche organische Umgebung kann jedoch in einem Festkörperfilm den Ladungstransport erschweren. Der Ligandenaustausch beeinflusst sowohl die interpartikuläre Bindung als auch die Oberflächenfallen. Ein kurzer Ligand ist nicht unter allen Umständen besser: Während sich der Transport verbessert, kann die Oberflächenpassivierung beeinträchtigt werden. Auch die Filmbildung, die Abscheidung und die erneute Auflösung der vorherigen Schicht sollten beobachtet werden.

Die Arbeit von Yang und seinen Kollegen aus dem Jahr 2017 präsentiert ein historisches Beispiel, bei dem n- und p-dotierte Komponenten aus unterschiedlich funktionalisierten Quantenpunkten zusammengeführt werden. Nachfolgende Studien zu orthogonalen Tinten beheben das Problem, dass beim Aufbringen der oberen Schicht die darunterliegende Schicht nicht zerstört wird. Diese sollten nicht als aktuelle Bestenliste, sondern als Methodenbeispiele für die Oberflächenchemie und das Design von Mehrschichtbeschichtungen betrachtet werden. [D40] [D41]

Vergleichsaufgabe. Vergleichen Sie organische, DSSC- und Quantenpunkt-basierte Ansätze für eine flexible und leichte Sensorstromversorgung. Schreiben Sie zunächst

die Lichtquelle, die Leistungsanforderungen und die Verpackungsbedingungen auf. Bestimmen Sie dann für jede Technologie drei Experimente, zwei wichtige Ausfallmechanismen und ein Stoppkriterium. Treffen Sie die Produktauswahl nicht allein anhand der Bandlücke.

Die gleichzeitige Optimierung von Optik, Passivierung und Kontakten

Drei Funktionen in einer einzigen Probe realisieren

Optisches Design regelt, dass nützliches Licht den Absorber erreicht und dort genutzt wird. **Passivierung** ist die Verringerung aktiver Defekte oder des Zugangs unerwünschter Ladungsträger zu defekten Bereichen. **Kontakttechnik** zielt darauf ab, die korrekte Ladung mit geringen Verlusten an den externen Stromkreis zu übertragen. Eine Beschichtung kann diese drei Aspekte auf unterschiedliche Weise beeinflussen. Daher wird die Veränderung nicht nur an einem einzelnen Parameter, sondern auch an der fertigen Zelle geprüft.

Dielektrikum ist in diesem Zusammenhang ein elektrisch isolierendes und polarisierbares Material. **TCO** steht für transparente leitfähige Oxide. **Metall** leitet in der Regel sehr gut Elektrizität, blockiert aber Licht. Die Brechungsindizes, die Absorption, die Dicke und die Kontaktfähigkeit dieser Schichten sind unterschiedlich. Einzelne Adjektive wie „transparent“, „isolierend“ oder „leitfähig“ liefern keine vollständige Materialbeschreibung für die Konstruktion.

Die Abscheidungsmethode anhand ihres Funktionsprinzips auswählen

ALD ist die atomlagenweise Abscheidung. Eine Dünnschicht wird durch aufeinanderfolgende, selbstlimitierende Reaktionsschritte auf der Oberfläche aufgebaut. Eine **konforme Beschichtung** ist eine Beschichtung, die die Vertiefungen und Erhebungen der Oberfläche mit ähnlicher Dicke bedeckt. ALD kann dafür nützlich sein, wobei die Ausgangsoberfläche und die Prozessbedingungen jedoch geeignet sein müssen. Bei der **Verdampfung** wird das Material in die Gasphase überführt und auf der Oberfläche kondensiert. Beim **Sputtern** werden Partikel vom Zielkörper abgetrennt. **PECVD** ist die plasmaunterstützte chemische Filmbildung. Die Methoden unterscheiden sich hinsichtlich Geschwindigkeit, Schädigung, Oberflächenabdeckung und Materialauswahl.

Zwei Arten von Widerstand unterscheiden

Schichtwiderstand fasst die laterale Leitfähigkeit einer Dünnschicht zusammen, wobei die Dicke berücksichtigt wird; die Einheit Ohm/Quadrat wird verwendet. Hierbei ist „Quadrat“ kein physikalisches Flächenmaß, sondern ein geometrisches Verhältnis. Der rechteckige Widerstand, der an einem homogenen Film zwischen zwei Kanten gemessen wird, ist das Produkt aus Schichtwiderstand und dem Verhältnis von Länge zu Breite. Der **spezifische Kontaktwiderstand** beschreibt den Übergang zwischen zwei unterschiedlichen Materialien an der Grenzfläche und wird auf die Fläche normiert.

Synthetisches Beispiel: In einer Schicht mit einem Flächenwiderstand von 50 Ohm/Quadrat beträgt die Strompfadlänge das Doppelte der Breite, wodurch ein einfacher geometrischer Widerstand von 100 Ohm entsteht. Diese Berechnung berücksichtigt nicht den Kontaktwiderstand an der Metall-Filmschicht-Grenzfläche. Durch Erhöhen der Schichtdicke kann der laterale Widerstand verringert werden, jedoch kann die parasitäre Absorption zunehmen. Die folgenden Experimente werden die optische Verlustleistung des Leitungsverstärkungseffekts in demselben Bauelement bewerten.

Verständniskontrolle: Garantiert der Name der Methode das Ergebnis?

„Es wurde mit ALD hergestellt“ bedeutet nicht, dass der Film auf jeder Oberfläche fehlerfrei ist und jedes Bauelement gut funktioniert. Wir müssen die Dicke, die Beschichtungskontinuität, die Grenzflächenchemie, den elektrischen Leckstrom und die Funktionalität der fertigen Zelle anhand ihrer Leistung testen. Die Methode ist ein Werkzeug; die Messung bestimmt, ob das Ziel erreicht wurde.

Die Funktion einer Schicht kann nicht allein durch ihren Namen erklärt werden. Eine „transparente Elektrode“ muss Licht durchlassen, den Strom seitlich leiten, einen geeigneten Kontakt mit der benachbarten Schicht herstellen und vor Schäden durch nachfolgende Prozesse geschützt sein. Eine „Passivierungsschicht“ kann die Oberflächenfehler reduzieren, aber gleichzeitig den Ladungsträgertransport erheblich behindern. Die Entwicklung zielt darauf ab, dass diese Funktionen in einem einzigen Bauelement zusammenwirken. Der Ablauf in diesem Kapitel verknüpft die Optik und die Physik des selektiven Kontakts aus dem ersten Buch mit messbaren Designvariablen.

Den optischen Gewinn richtig definieren

Eine Verringerung der Reflexion bedeutet nicht zwangsläufig eine Zunahme der Absorption. Licht kann auch von einer TCO-Schicht, einer Metallschicht, einer Transportschicht oder einer Verkapselung absorbiert werden. In einer einfachen Energiebilanz verteilt sich das einfallende Licht auf Reflexion, Transmission und die gesamte Absorption. Die gesamte Absorption wird dann zwischen dem nützlichen Teil im Absorber und den parasitären Schichten aufgeteilt. In einem Schichtsystem ist die optische Ausdehnung jeder Schicht aufgrund von Grenzflächeneffekten von ihren Nachbarschichten abhängig.

$$R(\lambda) + T(\lambda) + \sum_j A_j(\lambda) = 1. \quad (\text{II.10.1})$$

Diese Gleichung gilt für normalisierte Energieflüsse mit der gleichen optischen Geometrie. Bei einer Messung, bei der das gestreute Licht außerhalb des Detektors liegt, wäre es falsch, das fehlende Signal direkt der Absorption zuzuschreiben. Bei rauen oder strukturierten Proben werden die gesamte und die spiegelnde Reflexion getrennt betrachtet; gegebenenfalls wird eine integrierende Kugel verwendet. Es wird auch untersucht, ob die durch Ellipsometrie an dünnen Schichten ermittelten optischen Konstanten eindeutig sind, und zwar unter Berücksichtigung der Modellsensitivität. Das Entwicklungsziel könnte anstelle von „minimaler durchschnittlicher Reflexionsgrad“ der spektral gewichtete Sammelgewinn sein. Eine Antireflexionsschicht kann bei kurzen Wellenlängen sehr gut sein, bei langen Wellenlängen, bei denen die Zelle weniger effizient ist, jedoch schlecht. Vergleichen Sie die Änderung der externen Quanteneffizienz (EQE) mit der Änderung des Reflexionsgrads auf derselben Wellenlängenachse. Wenn die EQE sich nicht ändert, während die Reflexion abnimmt, kann das Licht in einer anderen Schicht absorbiert werden oder die neu erzeugten Ladungsträger können nicht effizient gesammelt werden.

Ein Beispiel für die Schichtdicke

Unter der Annahme einer einzelnen Wellenlänge und eines verlustfreien, einzelnen Layers ist die optische Viertelwellendicke für die anfängliche Auslegung nützlich:

$$n_f d = \frac{\lambda_0}{4}. \quad (\text{II.10.2})$$

Zum Beispiel beträgt die geometrische Dicke 75 nm für eine Mittenwellenlänge von 600 nm und einen Brechungsindex von 2,0. Diese Berechnung ist nicht automatisch optimal für ein Produkt mit einem breiten Sonnenspektrum, einer Winkelverteilung und einer realen Absorption. Im nächsten Schritt wird eine Sensitivitätsanalyse mit der

Dicke und der Unsicherheit der optischen Konstante durchgeführt. Wenn eine Textur oder ein mehrschichtiger Stapel vorhanden ist, wird ein geeignetes optisches Modell ausgewählt; die Transfermatrix für einen flachen Film erklärt nicht automatisch große, zufällige Texturen.

Die Verwendung von Parametern wie 65, 75 und 85 nm in einer Versuchsreihe zur Prozessvariation dient lediglich als didaktisches Beispiel. Der tatsächliche Bereich wird aus dem anwendbaren Fenster des jeweiligen Prozesses ausgewählt. Die Bezeichnung der Prozesszeit als „Dicke“, ohne die Dicke jeder Probe zu messen, ist problematisch, da die Abscheidungsrate mit der Anlagenhistorie variieren kann.

Auswahl der Beschichtungsmethode basierend auf der Funktion

Familie von Verfahren	Die Funktion, in der es besonders leistungsfähig ist.	Eine entscheidende Frage bei der Entwicklung.
ALD	Dünne und konforme Schicht durch Oberflächenreaktionen.	Sind Oberflächensättigung, anfängliches Wachstum und Zykluszeit geeignet?
PVD / Sputtern	Physikalische Abscheidung von TCO und Metallen.	Beschädigen Plasma und energiereiche Spezies die darunterliegende Schicht?
PECVD	Silizium- und dielektrische Dünnschichten.	Werden die Bereiche Wasserstoff, Plasmachemie und Oberflächenpassivierung gemeinsam kontrolliert?
Beschichtung aus Lösung	Dünnschichtmaterial mit großer Fläche bei niedriger Temperatur.	Sind die Benetzung, die Trocknung und die chemische Beständigkeit der darunterliegenden Schicht geeignet?
Metallisierung durch Drucken und Abscheiden	Lokale leitfähige Pfade	Wie werden Kontakt, Haftung, Barrierewirkung und Langzeitkorrosionsbeständigkeit nachgewiesen?

Diese Tabelle stellt keine Rangliste dar. Bei der Anwendung derselben Methode variiert das Prozessfenster je nach verwendeter Ausrüstung. Der Erfolg einer konformen Beschichtung in einem Laborgerät bedeutet nicht, dass die Liniengeschwindigkeit ausreichend ist. Ebenso garantiert eine hohe Beschichtungsgeschwindigkeit nicht die gewünschte Qualität der Grenzfläche. HJT- und TOPCon-Beispiele veranschaulichen diese Abhängigkeiten. [\[D04\]](#) [\[D09\]](#) [\[D32\]](#)

Den Schichtwiderstand vom Kontaktwiderstand unterscheiden

Der Schichtwiderstand beschreibt die laterale Leitfähigkeit innerhalb eines Films, während der spezifische Kontaktwiderstand den Stromfluss zwischen zwei Materialien definiert. Unter einer guten, leitfähigen Metallschicht kann ein schlechter Kontakt bestehen. Die Vierpunktmessung hilft, den Schichtwiderstand zu bestimmen, indem sie den Einfluss von Kontaktparasiten reduziert; die TLM-Struktur (Transmission Line Method) ermöglicht es, den Einfluss des Kontakts unter geeigneter Geometrie und Modell zu isolieren. Bei der TLM-Analyse sind die Stromverteilung, die Kontaktlänge und die Angemessenheit des gemessenen Bereichs von Bedeutung.

In der einfachen linearen TLM-Methode ändert sich der Gesamtwiderstand zwischen zwei Kontakten gleicher Breite linear mit dem Kontaktabstand:

$$R_{\text{tot}}(d) = 2R_c + \frac{R_{\text{sheet}}}{W}d. \quad (\text{II.10.3})$$

Der Achsenabschnitt entspricht hier der Summe der beiden Kontaktwiderstände. Verlassen Sie sich nicht nur auf die scheinbar gute Anpassung der Linie, wenn diese schlecht ist; überprüfen Sie verschiedene Abstände, Leckströme, die Homogenität der Schicht und den Probekontakt. Bei dünnen oder kurzen Kontakten ist eine Korrektur der Transferlänge erforderlich. Der aus dem TLM-Verfahren gewonnene Parameter ersetzt nicht die gesamte Serienverlustleistung in der Zelle; Verluste in den Metallfingern, den Sammelschienen und den Verbindungen sind zusätzlich vorhanden.

Das Metallmuster gemeinsam optimieren

Das Verengen der Fingerkontakte kann den Weg für den lateralen Ladungstransport verkürzen, führt aber möglicherweise zu einer stärkeren Abschattung und einem höheren Metallverbrauch. Das Vergrößern der Fingerkontakte reduziert zwar die Abschattung, kann aber die Druckkontinuität, die Höhe und den Widerstand beeinflussen. Daher werden die Fingerbreite, die Höhe, der Abstand, der spezifische Widerstand des Materials und der Kontaktwiderstand zusammen betrachtet. Obwohl das mikroskopische Bild einer feinen Linie ansprechend aussehen mag, können diskontinuierliche Bereiche oder eine schlechte Haftung die Zuverlässigkeit des Produkts beeinträchtigen.

In einer beispielhaften Verlustbilanz erhöht die optische Ausrichtung den Strom 0,8 %, während sie den Füllfaktor FF relativ zu 0,5 % verringert. Wenn die Spannung konstant bleibt, beträgt der resultierende Leistungsfaktor $1,008 \times 0,995 = 1,00296$, was einem Gewinn von etwa 0,30 % entspricht. Diese geringe Differenz sollte mit der Messunsicherheit und der Streuung innerhalb einer Produktionscharge verglichen werden. Wenn dieselbe Maßnahme die Akzeptanzrate der Produktion verringert, kann

sich das Verhältnis von Kosten zu Leistung weiter verschlechtern. Dieses Beispiel basiert nicht auf den Daten eines realen Unternehmens.

Wie diagnostizieren wir eine Veränderung der Grenzfläche?

Entwerfen Sie zunächst Referenzstrukturen, die vor und nach der vollständigen Zellherstellung gemessen werden können. Lebensdauer- oder PL-Messungen liefern Informationen über die Passivierung vor dem Kontakt; jedoch treten bei Kontaktierung auch Selektivität und Widerstand in Erscheinung. Es ist nicht überraschend, dass eine vor dem Kontakt verbesserte Oberfläche in der vollständigen Zelle nicht die gleiche Leistung erbringt. Die implizite Spannung, die tatsächliche Leerlaufspannung und der Füllfaktor werden zusammen ausgewertet. Abhängig von der Ursache der Differenz werden Experimente zur Metallisierung, zur selektiven Schicht oder zu Prozessschäden durchgeführt.

Die vorgeschlagene experimentelle Matrix besteht aus drei Zweigen: eine Probe mit veränderter Grenzflächenbehandlung, eine Kontrollprobe mit identischer chemischer oder thermischer Behandlung, die jedoch keine aktive Substanz aufnimmt, und eine Referenzprobe, die keiner Behandlung unterzogen wird. Nach der Beschichtung werden auch die Dicke und die optischen Eigenschaften aller drei Proben gemessen. Auf diese Weise wird geprüft, ob der vermeintliche Vorteil der „chemischen Passivierung“ tatsächlich auf eine optische Veränderung oder einen Reinigungseffekt zurückzuführen ist.

Abschnittsaufgabe. Wenn die TCO-Schichtdicke reduziert wird, steigt der Kurzschlussstrom, die Leerlaufspannung bleibt unverändert und der Füllfaktor sinkt. Nennen Sie mindestens drei Erklärungen dafür. Welche der Messungen von Schichtwiderstand, Kontaktwiderstand und EQE ermöglicht die Unterscheidung zwischen den Erklärungen? Entwerfen Sie das nächste Experiment so, dass es informativer ist als die einfache Rückführung einer einzelnen Schichtdicke.

Versuchsplanung: von der guten Probe zum zuverlässigen Prozessfenster

Warum ist bei der Prozessentwicklung eine systematische Kombination erforderlich?

Wenn wir einen Prozess verändern, nennen wir die Bedingung, die das Ergebnis beeinflusst, den **Faktor**, den getesteten Wert die **Stufe** und das gemessene Ergebnis die **Antwort**. Zum Beispiel sind die Glühdauer und die Dotierkonzentration zwei Faktoren; kurz-lang und niedrig-hoch sind ihre jeweiligen Stufen. Ein **vollfaktorielles Design** testet alle Kombinationen dieser Stufen. Zwei Faktoren mit jeweils zwei Stufen ergeben vier Kombinationen. Das Ziel ist nicht nur, mehr Proben zu untersuchen, sondern auch festzustellen, ob die Effekte voneinander abhängig sind.

Erstellen wir eine tabellarische Übersicht: Für das nicht-dotierte Material bei kurzer Prozessdauer sei der Wert 18 %, für das dotierte Material bei kurzer Prozessdauer 20 %, für das nicht-dotierte Material bei langer Prozessdauer 21 % und für das dotierte Material bei langer Prozessdauer 20 %. Der Einfluss der Dotierung beträgt bei kurzer Prozessdauer +2 Prozentpunkte und bei langer Prozessdauer -1 Prozentpunkt. Diese Differenz ist die **Interaktion**. Die allgemeine Aussage „Dotierung erhöht den Wirkungsgrad“ fasst diese vier Ergebnisse nicht korrekt zusammen. Die Prozessdauer muss angegeben werden.

Der optimale Punkt unterscheidet sich vom Prozessfenster

Das **Optimum** ist der Punkt, an dem das gewählte Kriterium am besten ist. Ein **robuster Prozess** hält die Akzeptanzgrenze auch bei kleinen Einstellabweichungen ein. Ein Verfahren, das an einer sehr schmalen Spitze 25% liefert, ist in der Produktion nicht immer einem Verfahren überlegen, das über einen breiten Bereich 24% erreicht. Messunsicherheit und die tatsächliche Einstellstreuung des Geräts können es erschweren, die Spitze erneut zu erreichen.

Block ist eine Versuchsgruppe, die einen gemeinsamen Einflussfaktor teilt, wie z. B. denselben Tag oder dieselbe Charge. Wenn in jedem Block sowohl eine Kontrollgruppe als auch eine neue Behandlungsgruppe vorhanden sind, wird die Vermischung des Tageseffekts mit dem Behandlungseffekt reduziert. Eine **zufällige Anordnung** reduziert die Anhäufung von Geräte-Drift oder Zeiteffekten in einer einzelnen Gruppe. Eine **unabhängige Wiederholung** ist die Wiederholung der Herstellung einer Probe; die Messung an mehreren Punkten auf derselben Zelle stellt dies nicht sicher.

Die **Analyse des Messsystems** versucht, die Variabilität von Gerät, Bediener und Wiederholungsmessung zu trennen. **Gauge R&R** ist eine Familie von Methoden, die die Komponenten der Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit untersucht. Wenn das Messrauschen größer ist als der angestrebte Gewinn, kann es ineffektiv sein, einfach mehr Rezepte zu testen. Zuerst wird die Genauigkeit des Mess- oder Versuchsaufbaus verbessert. Die abschließende Bestätigungsstudie wird dann mit Proben durchgeführt, die vom für die Auswahl verwendeten Datensatz unabhängig sind; die wiederholte Angabe des am besten erscheinenden Punkts auf denselben Daten ist keine Validierung.

Verständniskontrolle: Warum muss an jedem Tag eine Kontrollgruppe vorhanden sein?

Werden am Montag nur Kontrollproben und am Dienstag nur Proben des neuen Prozesses hergestellt, lässt sich der Unterschied zwischen den Tagen nicht vom Prozesseffekt trennen. Werden beide Gruppen an jedem Tag in geeigneter Reihenfolge hergestellt, gelingt diese Trennung besser. Lesen Sie vor der Auswertung der Daten zunächst, wie die Gruppen gebildet wurden, statt nur auf die Zahl der Zellen zu achten.

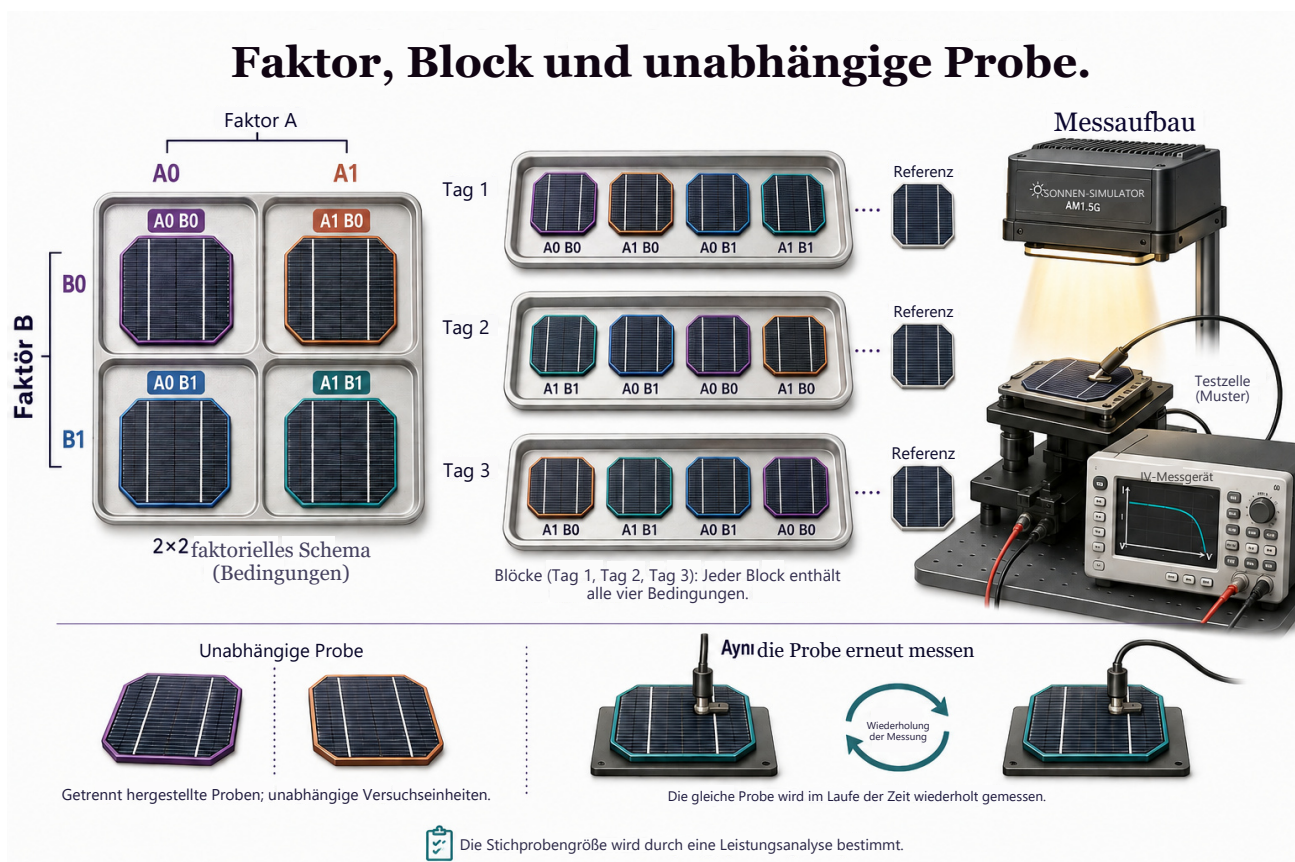


Abbildung 07. Beispiel einer Anordnung, in der faktorielle Bedingungen auf Tagesblöcke verteilt sind. Jeder Tag enthält alle Bedingungen; unabhängige Wafer-Wiederholungen und wiederholte Messungen derselben Probe prüfen unterschiedliche Unsicherheiten. Die Probenzahl ist hier keine aus einer Teststärkeanalyse abgeleitete Empfehlung. [D14] [D16] Mit einem Bildgenerierungswerkzeug erstellte konzeptionelle Illustration; keine Messaufnahme.

Ein Forscher benötigt oft vor einer größeren Anzahl von Experimenten eine bessere statistische Versuchsplanung. Das Vergleichen jeder neuen Rezeptur mit der Referenz der Vorwoche kann die Auswirkungen von Tag, Alter der Tinte, Ofenzustand und Bediener auf das Ergebnis verfälschen. Eine gute statistische Versuchsplanung legt vor Beginn des Experiments fest, welche Frage mit welchem Vergleich beantwortet werden soll. Das Rahmenwerk für die statistische Versuchsplanung des NIST ist eine nützliche Referenz, um die Beziehung zwischen Ziel, Faktor, Modell und Versuchsaufbau herzustellen. [D14]

Zielgröße und Versuchseinheit definieren

Die primäre Antwort sollte nicht nur der höchste Wirkungsgrad sein. Je nach Mechanismus der Untersuchung können stabile Leistung, Spannungsverlust, Kontaktwiderstand, Leistung nach einer bestimmten Alterungszeit oder die Akzeptanzrate ausgewählt werden. Sekundäre Antworten helfen bei der Erklärung des Mechanismus. Wenn die primäre Antwort nach dem Experiment in die am besten aussehende Messung geändert wird, entsteht eine Selektionsverzerrung. Wenn eine Änderung erforderlich ist, wird dies als neue Analyse deutlich vermerkt.

Die Versuchseinheit ist die kleinste Einheit, auf die die Intervention unabhängig angewendet wird. Zehn Zellen, die auf einer einzigen Beschichtung hergestellt werden, stellen keine zehn unabhängigen Beschichtungsdurchläufe dar. Das fünfmalige Messen derselben Zelle ist eine Messwiederholung und repräsentiert keine Produktionswiederholung. Bei der Untersuchung des Einflusses eines Zusatzes auf die Filmbildung sind unabhängige Tintenherstellungs- und Beschichtungspartien von Bedeutung. Die Zellen zeigen die Verteilung innerhalb einer Charge; sie geben allein keine Auskunft über die Verteilung zwischen den Chargen.

Diese Unterscheidung sollte sich in der Datenstruktur des Berichts widerspiegeln. Die Informationen zu Versuch, Charge, Substrat und Zelle werden innerhalb der Proben-ID in separaten Feldern gespeichert. Es wird angegeben, auf welcher Ebene der Mittelwert und die Fehlerbalken berechnet wurden. Wenn eine hierarchische Struktur vorhanden ist, wird ein Modell verwendet, das den Chargeneffekt berücksichtigt, oder eine geeignete Aggregation. Erzeugen Sie durch eine höhere Zellanzahl keine Unabhängigkeit, die tatsächlich nicht besteht.

Ein vollfaktorielles Beispiel

Betrachten wir zwei Faktoren: A, niedrige und hohe Temperbedingungen; B, zwei Grenzflächenbehandlungen. Die folgenden Zahlen sind vollständig synthetische, Mittelwerte stabilisierter Wirkungsgrade. Es wird angenommen, dass für jede Bedingung unabhängige Produktionswiederholungen an verschiedenen Tagen durchgeführt werden. Dies ist keine konkrete Rezepturvorschlag.

A-Niveau	B-Niveau	Durchschnittlicher Wirkungsgrad (%)
Niedrig	Niedrig	20,0
Hoch	Niedrig	20,6
Niedrig	Hoch	20,4
Hoch	Hoch	21,6

Die Auswirkung von A bei niedrigem B beträgt 0,6 Prozentpunkte, bei hohem B 1,2 Prozentpunkte. Daher ist die Auswirkung von A von B abhängig. Die Auswirkung von B bei niedrigem A beträgt 0,4, bei hohem A 1,0 Prozentpunkte. Die durchschnittlichen Haupteffekte betragen für A 0,9 und für B 0,7 Prozentpunkte. Die Differenz der Differenzen beträgt 0,6 Prozentpunkte; in der verwendeten faktoriellen Effektdefinition ist der Interaktionseffekt die Hälfte davon.

Wenn die kodierten Faktoren -1 und +1 verwendet werden, lautet das Modell, das die vier Mittelwerte beschreibt, wie folgt:

$$y = 20.65 + 0.45x_A + 0.35x_B + 0.15x_Ax_B. \quad (\text{II.11.1})$$

Dieses Modell erklärt die vier Punkte vollständig; dies bedeutet jedoch nicht, dass das Modell validiert ist. Wenn keine Wiederholung erfolgt, ist der experimentelle Fehler nicht vorhersagbar. Wenn keine Zwischenstufe vorhanden ist, kann keine Krümmung beobachtet werden. Um Schlussfolgerungen über den Mechanismus zwischen den Faktoren zu ziehen, sind Vergleichsmessungen erforderlich. Beispielsweise sollte die Hypothese, dass hohe Temperaturen die effektive Grenzflächensubstanz aktivieren, durch eine geeignete chemische oder Passivierungsmessung überprüft werden.

Wann ist es unzureichend, nur einen Faktor nach dem anderen zu ändern?

Zunächst A bei niedriger B-Einstellung zu scannen und anschließend B bei der ausgewählten A-Einstellung zu scannen, kann die Wechselwirkung verschleiern. Allerdings ist zu Beginn jeder Studie nicht zwingend ein vollständiges faktorielles Design erforderlich. Wenn unbekannte Anwendungsbereiche, Geräte- oder Filmsicherheitsprobleme oder Bereiche ohne Filmbildung vorliegen, ist eine kleine Voruntersuchung von Vorteil. Das Ziel der Voruntersuchung unterscheidet sich von dem der verifizierenden Untersuchung. Die Voruntersuchung wählt einen Kandidatenbereich aus; die verifizierende Untersuchung prüft, ob die Auswahl tatsächlich funktioniert.

Wenn die Anzahl der Faktoren zunimmt, können fraktionelle Designs die Kosten senken; jedoch können sich einige Effekte gegenseitig beeinflussen. Welche Effekte eine Aliase darstellen, wird im Versuchsplan festgehalten. Die Annahme „keine Interaktion“ wird nicht einfach nur deshalb ignoriert, um weniger Versuche durchzuführen. Wenn die Summe der Mischungsverhältnisse konstant ist, ist ein Ansatz mit unabhängigen Faktoren möglicherweise nicht geeignet; es ist ein Mischungsdesign erforderlich. Die Art und Weise, wie die einzelnen Verhältnisse verändert werden, wenn eines erhöht wird, hat eine chemische Bedeutung.

Randomisierung und Blockbildung

Die Randomisierung reduziert die Wahrscheinlichkeit, dass ein sich im Laufe der Zeit verändernder Faktor wiederholt unter denselben Bedingungen auftritt. Die Blockierung macht den bekannten Tages- oder Los-Effekt im Design sichtbar. Wenn an jedem Tag nur ein Rezept verwendet wird, wird keine Unterscheidung zwischen Rezept und Tag vorgenommen. Eine bessere Strategie ist es, an jedem Tag möglichst viele Referenz- und Variantenproben zusammen zu produzieren. Wenn die Position des Ofens wichtig ist, werden auch die Positionen der Proben ausgeglichen.

Da einige Faktoren schwer zu ändern sind, ist eine vollständige Randomisierung nicht möglich. Während die Ofentemperatur nicht für jede Zelle geändert werden kann, kann das Kontaktmuster geändert werden. In diesem Fall sind ein Design, das einer aufgeteilten Parzelle ähnelt, und geeignete Fehlerraten erforderlich. Die Analyse eines schwer zu ändernden Faktors, als ob er unabhängig auf jede Zelle angewendet würde, führt zu einer unnötig engen Konfidenzspanne.

Messsystemfähigkeit

Wenn die Differenz zwischen zwei Prozesswerten kleiner ist als das Messrauschen, ist die Erhöhung der Anzahl der Messungen nicht die einzige Lösung. Der Bediener, der Tag und die Gerätekomponenten werden getrennt betrachtet. Die wiederholte Messung derselben Proben testet das Messsystem, misst aber nicht die Produktionsvariabilität. Wenn die Proben während der Messung altern, ist die Reihenfolge der Wiederholungen ebenfalls wichtig. Das Konzept der Messsystemanalyse (Gauge R&R) stellt die Frage, welcher Anteil der Gesamtvariabilität auf den Messprozess zurückzuführen ist. [D16]

Verwenden Sie vordefinierte Akzeptanzkriterien. Wenn beispielsweise die Kontrollmessung der Referenzzelle außerhalb des festgelegten Bereichs liegt, können die Ergebnisse dieses Tages zur Überprüfung herangezogen werden. Dieser Bereich wird nicht geändert, um schlechte Ergebnisse nach dem Experiment auszusortieren. Daten, die aufgrund von Gerätefehlern ausgeschlossen werden, werden nicht gelöscht; der Grund, das Datum und die Art der unabhängigen Beweise, die den Fehler belegen, werden dokumentiert.

Das Optimum unterscheidet sich vom Prozessfenster

Auf einer Oberfläche kann ein einziger höchster Punkt existieren; bei der Herstellung ist das Verhalten um diesen Punkt von Bedeutung. Ein enger Optimalbereich kann nutzlos sein, wenn er bei geringfügigen Änderungen der Temperatur oder der Durchflussrate zu großen Verlusten führt. Das Ziel ist es manchmal, nicht den höchsten Durchschnittswert, sondern einen breiten Bereich zu wählen, der über einem akzeptablen Schwellenwert liegt. Dabei werden auch Störfaktoren wie die Charge des Rohmaterials und der Zustand der Geräte berücksichtigt.

Wenn der Prozess stabil ist und die Annahmen einer geeigneten Verteilung erfüllt sind, können Leistungsindikatoren verwendet werden. Bei dem von NIST definierten Ansatz werden die Toleranzgrenze und die Prozessstreuung verglichen. [D15]

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma}, \quad C_{pk} = \min \left(\frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \right). \quad (\text{II.11.2})$$

Diese Kennzahlen korrigieren keinen Prozess, der außer Kontrolle ist. Bei zeitlich driftenden Daten oder einer Mischverteilung kann ein hoher Cpk-Wert auf Grundlage eines einzigen Sigma irreführend sein. Wenden Sie bei einer einseitigen Produktanforderung die zweiseitige Formel nicht unbesehen an. Auch Messfehler verbreitern die Verteilung; die Fehlerquellen werden zuerst getrennt untersucht.

Letzter Validierungstest

Bei der Optimierung wird nicht die beste ausgewählte Charge verwendet und dokumentiert. Stattdessen wird die ausgewählte Bedingung mit neuem Material, an einem neuen Tag und, wenn möglich, mit einem anderen Bediener gemäß einem vordefinierten Plan wiederholt. Die Referenz befindet sich im selben Block. Es werden nicht nur die durchschnittlichen Gewinne, sondern auch die untere Ausreißerverteilung, die Akzeptanzrate und neue Ausfallmechanismen bewertet. Wenn die erwarteten Gewinne nicht wiederholt werden, werden diese Ergebnisse als gescheitertes Experiment gespeichert und können eine der wichtigsten Einschränkungen für das nachfolgende Modell darstellen.

Übungsaufgabe. In der synthetischen Tabelle wurde die Bedingung „hoher Wert - hoher Wert“ ausgewählt. Im neuen Batch betrug das Ergebnis 20,3. Erstellen Sie einen Validierungsplan, der die Erklärungen unterscheidet, dass entweder die Optimierung fehlerhaft ist, die Messung abweicht oder ein versteckter Faktor vorliegt. Geben Sie an, welche Proben am selben Tag produziert werden müssen und welche Daten vorab fixiert werden sollen.

Verbesserung der Beständigkeit und Ermittlung des Ausfallmechanismus

Symptom, Mechanismus und zugrunde liegende Ursache differenzieren

Wenn die Leistung eines Moduls sinkt, ist das **Symptom** ein Leistungsverlust. Der **Mechanismus** ist der physikalische oder chemische Prozess, der diesen Verlust verursacht, z. B. Kontaktkorrosion, Delamination an der Grenzfläche oder eine Veränderung der Ionenverteilung. Die **Ursache** ist, warum dieser Mechanismus in diesem speziellen Produkt wirksam wird: Dies könnte auf eine unzureichende Randabdichtung oder eine fehlerhafte Aushärtung zurückzuführen sein. Die Aussage „Feuchtigkeit hat es beschädigt“ ist keine vollständige Diagnose, da sie nicht angibt, welches Material, welcher Pfad und welche elektrischen Auswirkungen betroffen sind.

Stress ist eine beanspruchende Bedingung, die auf ein Bauelement ausgeübt wird. Temperatur, Feuchtigkeit, Licht und elektrische Spannung sind verschiedene Arten von Stress. Eine **Kontrollprobe** ermöglicht den Vergleich, wenn eine dieser Bedingungen verändert wird. Das gleichzeitige Erhöhen aller Stressfaktoren kann zu einer schnellen Verschlechterung führen, erschwert aber die Identifizierung des verantwortlichen Faktors. Ein Entwicklungstest unterscheidet sich in dieser Hinsicht von einem reinen Qualifikationstest.

Schwellenwert und Zeitablauf

T80 ist die Zeit, in der die definierte Anfangsleistung auf 80 % abfällt. Wenn die Anfangsleistung 10 W beträgt, liegt der Schwellenwert bei 8 W; für eine Anfangsleistung von 12 W beträgt der Schwellenwert 9,6 W. Wenn wir kurzzeitige Veränderungen zu Beginn ignorieren, müssen wir angeben, welche Zeit und welche Begründung wir verwenden. Wenn der Test endet, bevor der Schwellenwert erreicht wird, ist die Zeit **zensiert**; die vollständige Lebensdauer wurde nicht ermittelt.

Synthetische Diagnose: Nach der gleichen Belastung hat sich der Strom nur geringfügig verändert, die Spannung ist erhalten geblieben, und der Füllfaktor (FF) ist gesunken. Die Wahrscheinlichkeit eines Kontakt- oder Leitungsverlusts wird relevant, ist aber allein keine eindeutige Ursache. Die elektrische Kennlinie, die Widerstandsanalyse und die Position der Beschädigung werden gemeinsam untersucht. Das sofortige Schneiden und Öffnen der Probe kann die vorherigen Messbedingungen unwiderruflich verändern; die Reihenfolge der Untersuchungen sollte geplant werden.

Der **Beschleunigungsfaktor** ist ein Ergebnis eines Modells, das die Geschwindigkeiten eines Mechanismus unter Test- und Einsatzbedingungen in Beziehung setzt. Er ist keine universelle Konstante. Wenn bei hoher Temperatur ein anderer Ausfallmechanismus einsetzt, kann die Lebensdauer im Feld nicht mit diesem Faktor berechnet werden. **Wiederherstellung** bezieht sich auf die teilweise Rückkehr der Leistung nach einer Ruhephase oder unter veränderten Bedingungen; sie wird separat von permanenten Verlusten berichtet. Die folgende Stressmatrix ermöglicht Vergleiche, um den Mechanismus zu identifizieren, und legt eine erneute Prüfung des reparierten Produkts fest.

Verständniskontrolle: Repariert oder den Ausfall nur an eine andere Stelle verlagert?

Eine neue Verkapselung kann zwar den Feuchtigkeitseintritt reduzieren, aber gleichzeitig die thermische Belastung erhöhen. Der Erfolg bei einem einzelnen, alten Zuverlässigkeitstest ist nicht ausreichend; es sind geeignete Kontrollen erforderlich, die den neuen, veränderten mechanischen, optischen und elektrischen Risiken entsprechen. Die Verbesserung muss die Akzeptanz des gesamten Produkts unter definierten Betriebsbedingungen gewährleisten.

Ein Bauelement kann eine hohe Ausgangsleistung aufweisen; der Wert des Produkts hängt jedoch davon ab, wie sich diese Leistung unter den Einsatzbedingungen verändert. Eine Beständigkeitsprüfung besteht nicht nur darin, eine Probe extremen Bedingungen auszusetzen und die Endleistung zu messen. Es muss dargelegt werden, welcher Mechanismus beschleunigt wird, wie ähnlich die Laborbelastung den realen Bedingungen entspricht und wie die Messung reversible Veränderungen berücksichtigt. Die in dem ersten Buch behandelten Zuverlässigkeitskonzepte werden hier in einen Versuchsplan und eine Diagnoseabfolge übersetzt.

Symptom, Mechanismus und zugrunde liegende Ursache

Leistungsverlust ist ein Symptom. Korrosion, Rissbildung, Ionenwanderung oder eine Grenzflächenreaktion können der Mechanismus sein. Unzureichende Randabdichtung, verschmutzte Oberfläche oder ein ungeeignetes Prozessfenster können die Ursache in der Produktion sein, die den Mechanismus auslöst. Wenn diese Ebenen nicht getrennt betrachtet werden, reichen Erklärungen wie „Feuchtigkeit hat den Schaden verursacht“ nicht aus, um das Rezept zu verbessern. Es müssen Fragen gestellt werden wie: Auf welchem Weg ist die Feuchtigkeit eingedrungen, mit welchem Material hat sie interagiert und welchen elektrischen Verlust hat sie verursacht?

Der erste Schritt ist die Überprüfung der Messung selbst. Sind Referenz, Kontakt, Maske und Temperatur identisch? Tritt der Leistungsverlust bei stabiler Arbeitsweise oder bei schneller Abtastung auf? Erholt sich die Probe, wenn sie im Dunkeln gelagert

wird? Eine Erholung bedeutet nicht unbedingt, dass keine bleibenden Schäden vorliegen; reversible und irreversible Komponenten können gleichzeitig auftreten. Vor der Messung wird eine Ruhezeit eingelegt, und die Alterungskurven werden ohne Aufzeichnung dieser Ruhezeit nicht verglichen.

Beobachtetes Symptom	Mögliche Erklärungen	Untersuchung zur Unterscheidung
Der Strom nimmt ab, es gibt eine spektrale Veränderung.	Optische Vergilbung, Delamination, Sammelverluste	Transmissions-/Reflexionsgrad, EQE, Querschnitt
Der Füllfaktor sinkt, die Spannung ändert sich nur geringfügig.	Kontakt- oder Verbindungswiderstand, lokaler Leckstrom	Dunkelkennlinie, EL, Thermografie, Kontaktprüfung
Die Spannung sinkt.	Rekombination, Shunt, Grenzflächenänderung	PL/EL, Dunkelkennlinie, Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke
Lokale Verdunkelung oder Hotspot	Riss, Unterbrechung der Verbindung, Inkompatibilität.	EL und Stromverteilung, kontrollierte Thermografie
Änderung in Abhängigkeit vom Messverlauf.	Metastabilität, ionischer oder kapazitiver Prozess.	Festes Protokoll, zeitaufgelöste Überwachung

Die Tabelle dient nicht zur Diagnose, sondern zur Auswahl der nächsten Messung. Vermeiden Sie es, anhand eines einzelnen Bildes den gesamten Mechanismus zu bestimmen. Beispielsweise kann ein dunkler Bereich in einem EL-Bild sowohl auf ein Problem mit der elektrischen Verbindung als auch auf eine optische Blockade zurückzuführen sein. Die Vorher-Nachher-Bilder müssen bei gleichem Strom und gleicher Temperatur aufgenommen werden.

Die Belastungsmatrix aufstellen

Hitze, Feuchtigkeit, Licht, elektrische Spannung und mechanische Belastungen können nicht nur einzelne Auswirkungen haben, sondern auch Wechselwirkungen verursachen. Ein Feuchtigkeits- und Hitzetest in Dunkelheit repräsentiert nicht vollständig das Verhalten einer Zelle, die im Licht betrieben wird. Zuerst wird eine Hypothese über den Mechanismus aufgestellt; danach wird eine Belastung ausgewählt, um diesen zu untersuchen. Verkapselte und nicht verkapselte Proben liefern Antworten auf unterschiedliche Fragen. Ein nicht verkapseltes Folienmaterial zeigt die chemische Empfindlichkeit, während ein verkapseltes Bauelement auch die Barriere- und Randkonstruktion berücksichtigt.

Im Bereich der Perowskit-Forschung stellt das ISOS-Abkommen einen wichtigen Rahmen dar, der darauf abzielt, die Vergleichbarkeit der Testbedingungen und der

Berichterstattung zu gewährleisten. In der anfänglichen Definition sollten die Umgebungsbedingungen, die elektrischen Betriebsparameter und die Messmethode über die Zeit hinweg klar definiert sein. Die Anwendung einer ISOS-Bedingung bedeutet nicht, dass eine kommerzielle Modulzertifizierung vorliegt. [D17]

Die IEC 61215-Familie befasst sich mit der Auslegungseignung und der Typzulassung; die IEC 61730-Familie befasst sich mit der Modulsicherheit. Der Katalogeintrag zeigt den Umfang der Norm; er ersetzt nicht das vollständige, detaillierte Verfahren. Dieses Buch weist ausdrücklich darauf hin, dass der Katalog verwendet werden sollte, wenn die vollständige Norm nicht gelesen wird. Das Bestehen einer Testreihe garantiert keine genaue Lebensdauer von dreißig Jahren in einem bestimmten Anwendungsbereich. Die Notwendigkeit einer erneuten Prüfung bei Änderungen des Designs oder der Materialien wird separat bewertet; die IEC 62915 ist eine der referenzierten Rahmenbedingungen in diesem Zusammenhang. [D21] [D22] [D23]

T80-Definition und Zensierung

T80 ist die Zeit, die benötigt wird, um die ausgewählte Referenzleistung von 80 % zu erreichen. Die Referenz kann die erste Messung sein, entweder die Leistung nach der anfänglichen Stabilisierung oder eine andere Definition; welche verwendet wird, wird klar angegeben. Es ist irreführend, eine längere Lebensdauer anzugeben, indem der anfängliche, schnelle Abfall ignoriert wird. Wenn sowohl die anfängliche als auch die stabilisierte Leistung benötigt werden, werden sie zusammen in einer normalisierten Reihenfolge angegeben.

Wenn das Testobjekt nach Abschluss des Tests noch auf 80 % liegt, wurde T80 nicht gemessen. Es ist bekannt, dass die Zeitspanne länger ist als die letzte Beobachtungsdauer; dies sind rechtszensierte Daten. Wenn von fünf Testobjekten zwei ausfallen und drei weiterhin funktionieren, wäre es falsch, nur den Mittelwert der beiden ausgefallenen Objekte als „Lebensdauer“ anzugeben. Wenn die Zeitauflösung gering ist, kann der Schwellenwertübergang zwischen zwei Messungen liegen; dieses Intervall birgt ebenfalls eine Unsicherheit.

Synthetisches Beispiel. Bei vier Proben wird der 80 %-Schwellenwert nach 820, 1060 bzw. 1390 Stunden überschritten; die vierte Probe weist nach 1500 Stunden immer noch die 87 %-Leistung auf. Die T80-Zeit der vierten Probe beträgt nicht 1500. Das Ergebnis wird als „drei Schwellenwertüberschreitungen, eine rechtsseitig zensierte Beobachtung“ gespeichert. Um die gegensätzliche Rezeptur zu vergleichen, werden die Anzahl der Proben, die Stressbedingungen und die Anfangsdefinition aufeinander abgestimmt. Vier Proben sind möglicherweise nicht ausreichend, um die breite Produktionsstreuung genau zu bestimmen.

Bedingungen für die Arrhenius-Beschleunigung

Unter der Annahme eines einzigen, thermisch aktivierten, geschwindigkeitsbestimmenden Mechanismus kann die Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur gemäß der Arrhenius-Gleichung variieren. Der Beschleunigungsfaktor für Test- und Betriebstemperaturen wird durch das folgende Modell ausgedrückt:

$$AF = \exp \left[\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_{\text{use}}} - \frac{1}{T_{\text{test}}} \right) \right]. \quad (\text{II.12.1})$$

Hier müssen Temperatur in Kelvin, Aktivierungsenergie und die Boltzmann-Konstante in konsistenten Einheiten angegeben werden. Diese Gleichung ist nicht nur ein Werkzeug zur Kurvenanpassung; der zugrunde liegende Mechanismus muss weiterhin gültig sein. Wenn bei hohen Temperaturen ein Phasenübergang, eine Erweichung des Materials oder eine andere Reaktion einsetzt, wird der direkte Transportprozess gestört. Der Einfluss von Feuchtigkeit und Licht kann nicht durch einen Temperaturfaktor verschleiert werden.

In einer beispielhaften Berechnung ergibt sich bei einer Aktivierungsenergie von 0,5 eV, einer Betriebstemperatur von 25 °C und einer Testtemperatur von 85 °C ein Faktor von etwa 26. Diese Zahl ist nicht der Lebensdauerfaktor eines realen PV-Moduls, sondern das Ergebnis des gewählten Modells. Wenn die Aktivierungsenergie unbekannt ist, wählen Sie keinen beliebigen Literaturwert, um daraus eine Garantiedauer in Jahren abzuleiten. Für verschiedene Temperaturen sind Daten zum Mechanismus und zur Geschwindigkeit erforderlich; ein Feldvergleich wird zusätzlich durchgeführt.

Die Probe für die Diagnose schützen

Bei der Fehleranalyse sollte die wertvollste Probe nicht gleich beim ersten Verfahren verbraucht werden. Zuerst werden Fotos aufgenommen, elektrische Messungen durchgeführt und zerstörungsfreie Untersuchungen vorgenommen. Anschließend wird ein Plan für die Querschnitts- oder chemische Analyse erstellt. Kontaminations- und Transportbedingungen werden dokumentiert. Das von der beschädigten Region erhaltene Signal wird mit der intakten Region derselben Probe und einer unbehandelten Referenzprobe verglichen.

Die Fehleranalysen des IEA PVPS zu neuen Zell- und Modultechnologien betonen, dass mit dem technologischen Fortschritt auch die Fehlerarten neu bewertet werden müssen. Ein für die vorherige Technologie erfolgreiches Verfahren oder ein Testablauf sollte nicht direkt auf die neue Schichtstruktur übertragen werden. [D18]

Akzeptanz der Verbesserung

Die neue Barriere kann zwar eine längere Lebensdauer gewährleisten, aber auch optische Verluste verursachen. Die neue Passivierung kann zwar die anfängliche Leistung erhöhen, aber auch eine schnellere Degradierung unter Lichteinwirkung bewirken. Daher werden die anfängliche Leistungsverteilung, die nach der Beanspruchung verbleibende Leistung, der Ausfallmodus und die Herstellbarkeit in derselben Entscheidungsdatei erfasst. Die Bewertung erfolgt nicht nur anhand der besten Probe, sondern anhand einer zuvor definierten Probengruppe.

Aufgabe: Eine Perowskit-Zelle ist im Dunkeln stabil, unter Lichteinwirkung zerfällt sie jedoch schnell; im Dunkeln erholt sie sich teilweise. Entwerfen Sie eine Matrix, die die Auswirkungen von Licht, Temperatur, elektrischem Betriebspunkt und Verpackung voneinander trennt. Beschreiben Sie, welche Messungen die reversible Veränderung und welche den irreversiblen Schaden untersuchen. Geben Sie im Bericht keine Lebensdauer im Feld an, die nicht nachgewiesen wurde.

Von der Zelle zum Modul: Verbindung, Verkapselung und Pilotfertigung

Im Modul werden Strompfad und Schutzpfad gleichzeitig aufgebaut

Die Zellen werden mit **Bändern, Drähten** oder anderen leitfähigen Verbindungen zusammengefügt. Bei einer Reihenschaltung ist es wichtig, die Leistungsverteilung und die Abstimmung der Zellen zu berücksichtigen, da der gleiche Strom durch sie fließt. Das Halbieren einer Zelle kann den Strom und die Leitgeometrie verändern und gleichzeitig neue Kanten und Beschädigungen durch die Verarbeitung verursachen. Das **Zelle-zu-Modul-Leistungsverhältnis**, kurz CTM, vergleicht die Modulleistung mit der entsprechenden Gesamtleistung der verwendeten Zellen. Optische Verstärkung und elektrische Verluste können im gleichen Verhältnis auftreten.

Laminierung ist das Zusammenfügen von Zellen und Schutzschichten unter definierten Temperatur-, Druck- und Zeitbedingungen. Das **Encapsulant** ist das dazwischenliegende, schützende und verbindende Material. Die **Vernetzung** ist die Bildung einer chemischen Netzwerkstruktur und die Entwicklung der endgültigen Eigenschaften in bestimmten Polymeren. **Delamination** ist die Trennung der Schichten voneinander. Das Vorhandensein von Luftspalten innerhalb eines Moduls kann sowohl die optische als auch die mechanische und elektrische Zuverlässigkeit beeinträchtigen.

Warum sind P1, P2 und P3 drei getrennte Strukturierungslinien im Dünnschichtmodul?

Anstatt eine durchgehende Dünnschicht auf einem Glas zu verwenden und diese direkt als einzelne Zelle einzusetzen, kann sie in Streifenzellen unterteilt werden. In einer typischen sequenziellen Fertigungsanordnung bildet **P1** die Linie, die die erste leitfähige Schicht isoliert, **P2** die Öffnung, an der die elektrische Verbindung zur benachbarten Zelle hergestellt wird, und **P3** die Isolierlinie, die die nachfolgenden Schichten trennt. Die genaue Anordnung der entfernten Schichten und die Reihenfolge hängen von der Architektur ab. Die drei Schritte sind nicht einfach nur drei parallele Trennlinien; sie sind die einzelnen Funktionen der Reihenschaltung.

Berechnung der synthetischen Fläche: Die Breite jeder Wiederholung beträgt 10 mm, die Summe aus Kontakt- und Isolationsbereich, die die Lichtnutzung nicht optimiert, beträgt 0,5 mm. In einer einfachen Streifengeometrie kann das nutzbare Breitenverhältnis 95 % betragen. Das Verengen der Linie kann die Fläche erhöhen, reduziert aber die Isolierungstoleranz und erhöht das Risiko von Kriechströmen. Ein gutes Moduldesign berücksichtigt beide Effekte zusammen.

Eine **Pilotfertigungsline** ist eine Produktionsumgebung, in der der Prozess in größerem Maßstab getestet und die Steuerung erlernt wird. Der **Kontrollplan** legt fest, welche Größe in welchem Schritt, wie und wie oft gemessen wird. Das Ergebnis des Pilotversuchs ist nicht nur eine gute Stichprobe, sondern auch Wissen, das auf andere Teams und Geräte übertragen und angewendet werden kann. Der folgende Abschnitt verknüpft diese Aufzeichnungen von der Zellmessung bis zur Linienabnahme.

Verständniskontrolle: Warum dient P2 nicht nur der Isolation?

Die Funktion von P2 besteht darin, die entsprechende Schicht zu erreichen und eine Verbindung zwischen den benachbarten Zellen herzustellen. Wenn man es lediglich als „eine weitere Rille“ betrachtet, kann dies zu einem offenen Stromkreis oder einem hohen Kontaktwiderstand führen. In einem Querschnitt sollte dargestellt werden, welche Schicht jede Rille entfernt und welche sie schützt.

Die Leistung der Zelle im Modul erhalten.

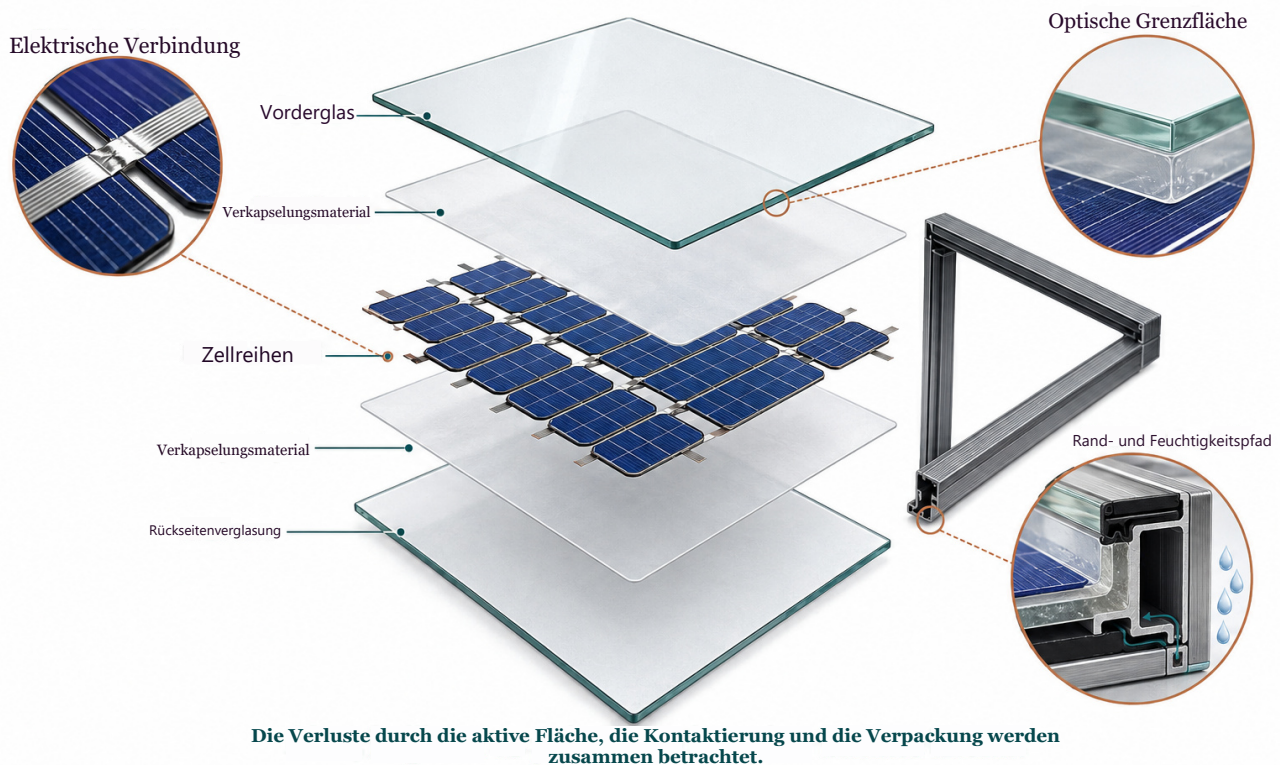


Abbildung 08. Repräsentative Schichten und kritische Grenzflächen eines Glas-Glas-Moduls, das kristallines Silizium verwendet. Die elektrische Verbindung, die optische Transmission und der Kantenschutz beeinflussen gemeinsam die in der Zelle erzeugte Leistung und die Haltbarkeit. [D01] [D18] [D22] Mit einem Bildgenerierungswerkzeug erstellte konzeptionelle Illustration; keine Messaufnahme.

Die im Labor gemessene Zelle ist lediglich eine Komponente des Moduls. Das Schneiden, Verbinden, Verpacken der Zellen und die Bestimmung der Produktfläche führen zu zusätzlichen Verlusten. Die optische Anpassung kann unter bestimmten Bedingungen auch zu einer Verbesserung führen. Daher ist es nicht ausreichend, den Zellwirkungsgrad direkt mit der Modulfläche zu multiplizieren. Der

Entwicklungsprozess sollte verfolgen, welche Zelleigenschaft zu welchem Modulverlust führt.

Die CTM-Bilanz aufstellen

Das Verhältnis von Zelle zu Modul ist das Verhältnis der Modulleistung zu der Summe der individuellen Leistungen der verwendeten Zellen unter definierten Bedingungen. Die spektralen, temperaturabhängigen und flächenbezogenen Definitionen der Zell- und Modulmessungen müssen übereinstimmen. Da sich die optische Umgebung ändert, können einige Beiträge positiv sein, während Beiträge wie Widerstand und Inkompatibilität negativ sein können. Es ist nicht korrekt, CTM (Cell-to-Module) lediglich als einen Verlustprozentsatz zu betrachten.

$$CTM = \frac{P_{\text{module}}}{\sum_i P_{\text{cell},i}}. \quad (\text{II.13.1})$$

Synthetisches Beispiel. Die Summe der separat gemessenen Zelleistungen beträgt 600 W. Innerhalb des Moduls soll die optische Anpassung einen Gewinn von 1,5 %, die Verbindung einen Verlust von 2 % und die Fehlanpassung einen Verlust von 1 % verursachen. In einem multiplikativen, einfachen Modell beträgt die Modulleistung $600 \times 1,015 \times 0,98 \times 0,99 = 590,85$ W. CTM beträgt ungefähr 98,48 %. Die Verlustterme sind in der Realität möglicherweise nicht vollständig voneinander unabhängig; diese Berechnung dient dazu, das Prinzip der Bilanz zu veranschaulichen. Für den Modulwirkungsgrad wird zusätzlich die Aperturfläche oder die Gesamtfläche des Produkts angegeben.

Zellteilung und Zellabstimmung

Das Aufteilen der Zelle in kleinere Teile kann den Strom und die Verbindungswiderstände verändern und neue Kanten erzeugen. Die Schnittmethode, die Beschädigung der Kanten, Mikrorisse und die anschließende Passivierung sind von Bedeutung. Vergleichen Sie die Gesamtleistung vor und nach dem Schneiden unter den gleichen Bedingungen. Das Messen nur der besseren der beiden Teile nach dem Schneiden verschleiern den Verlust durch das Schneiden. EL-Bilder, elektrische Daten und mechanische Festigkeit werden gemeinsam bewertet.

In einer Reihenschaltung führen alle Zellen denselben Strom; Inkompatibilitäten lassen sich nicht allein durch Unterschiede im Kurzschlussstrom erklären. Die Form der Kennlinien sowie das Verhalten der Sperrspannung unter Temperatureinfluss und bei Verschattung sind ebenfalls von Bedeutung. Der Zellabgleichalgorithmus kann anhand realer Kennlinien validiert werden. Eine Bypass-Diode beseitigt keine Zelldefekte; sie stellt unter bestimmten Reihenschaltungsbedingungen einen Strompfad bereit. Anordnung, Temperatur und Zuverlässigkeit des Kabelkastens sind separate Designaspekte.

Verbindungsoptionen

Die Art der Verbindung, sei es durch Bandkontaktierung, Mehrdrahtverbindung, Schindeltechnik oder einen anderen Ansatz, beeinflusst die Beschattung, die Metalllänge, die mechanische Belastung und die Verarbeitungstemperatur. Eine Verbindung mit niedrigem Widerstand ist nicht ausreichend, wenn die Haftung schlecht ist. Bei Temperaturwechseln muss die Spannung zwischen den unterschiedlich ausdehnenden Materialien überwacht werden. Zug- oder Abriebtests werden durchgeführt, und die elektrische Leitfähigkeit sowie die Leistung nach der Alterung werden mit derselben Verbindungskonfiguration verglichen.

Bei dem neuen Verbindungsmaterial kann der erste Test den elektrischen Kontakt, der zweite Test die mechanische Festigkeit und der dritte Test die Alterungsbeständigkeit innerhalb der Zelle untersuchen. Diese drei Ergebnisse können nicht gegeneinander ausgetauscht werden. Wenn bei der Einstellung des Verbindungsprozesses (z. B. durch Pressen, Löten oder Kleben) nur die höchste momentane Haftkraft ausgewählt wird und dies zu einer Beschädigung der Zelle führt, handelt es sich um eine fehlerhafte Optimierung.

In Dünnschichtmodulen: P1, P2 und P3

Ein monolithisches Dünnschichtmodul kann die unteren Zellstreifen auf einem Glas- oder Filmsubstrat miteinander verbinden. P1 trennt in der Regel die erste Elektrode in Segmente; P2 öffnet den Bereich, an dem die Verbindung zur Elektrode der nächsten Zelle hergestellt wird; P3 trennt die letzte leitfähige Schicht, um unerwünschte Kurzschlüsse zwischen benachbarten Streifen zu vermeiden. Welche Schicht in welcher Reihenfolge entfernt wird, sollte zusammen mit der tatsächlichen Schichtfolge und dem Herstellungsprozess dargestellt werden. Verwechseln Sie nicht die Bezeichnungen P1-P2-P3 mit einer einheitlichen Schichtliste für alle Architekturen.

Die Arbeit von Yang und seinen Kollegen über die Perowskit-Modulverbindung ist ein Beispiel dafür, dass die Verbindungszone nicht nur eine geometrische Lücke ist, sondern dass auch das lokale Material und das Kontaktverhalten das Modulergebnis beeinflussen. Die separate Angabe des Wirkungsgrads der aktiven Fläche und des Wirkungsgrads der Leerfläche macht den Flächenverlust deutlich. [\[D35\]](#)

Bei der Entwicklung von Lasern werden Wellenlänge, Impulsdauer, Energiedichte, Wiederholfrequenz, Fokus, Scangeschwindigkeit und Impulsüberlappung gemeinsam betrachtet. Ein optisch ansprechendes Kratzerbild kann darauf hindeuten, dass die darunterliegende Elektrode beschädigt wurde oder an der Seitenwand leitfähige Rückstände hinterlassen hat. Zusätzlich zur optischen Analyse werden entlang des Kratzers die Isolations- und Kontaktwiderstände gemessen. Bei der Reduzierung der Kratzerbreite wird das Risiko eines Kurzschlusses aufgrund von Rückständen und einer ungleichmäßigen Ausrichtung bewertet.

$$GFF = \frac{A_{\text{active}}}{A_{\text{aperture}}}. \quad (\text{II.13.2})$$

Der GFF ist der geometrische Füllfaktor; er ist nicht identisch mit dem elektrischen J-V-Füllfaktor. In einer **vereinfachten Berechnung** ist, wenn die Ausnutzung der aktiven Fläche 22 % und der GFF 95 % beträgt, die Ausnutzung der offenen Fläche 20,9 %, vorausgesetzt, es gibt keine weiteren Verluste. In einem realen Modul werden die Verluste durch Verbindungen und laterale Transportmechanismen zu diesem einfachen Flächenfaktor addiert. Wenn Sie eine große Fläche mit einer kleinen Zelle vergleichen, geben Sie an, welche Fläche im Nenner verwendet wird.

Die Verkapselungsschichten bilden ein System

Das Glas oder die Deckschicht erfüllt optische, mechanische und umweltbezogene Funktionen. Das Verkapselungsmaterial sorgt für eine optische Kopplung und mechanische Unterstützung; es kann auch chemische Wechselwirkungen eingehen. Die Rückseitenfolie oder das zweite Glas bildet zusammen mit den Randabdichtungen und den Kabeldurchführungen ein Barriere-System. Es wird nicht davon ausgegangen, dass ein einzelnes Material mit geringer Wasserdampfdurchlässigkeit die gleiche Barriereleistung für das gesamte Modul erbringt.

Das Temperatur-Zeit-Druck-Profil beim Laminieren steht in Beziehung zum Fließen und Aushärten des Materials. Übermäßiges Fließen kann die Position der Zelle oder die Verbindung verändern; unzureichendes Fließen kann Lücken hinterlassen. Neue Absorber- oder Kontaktschichten sind möglicherweise nicht mit dem Verkapselungsmaterial kompatibel. Daher werden leere Pakete, Testfilme, kleine Module und Zielbereichsmodule in verschiedenen Phasen verwendet. Nach dem Verpacken werden nicht nur die Leistung, sondern auch das optische Erscheinungsbild, die Haftung und die elektrische Sicherheit überprüft.

Kontrollplan für die Pilotanlage

Eine Pilotanlage ist nicht einfach eine kleine Fabrikattrappe, sondern ein Werkzeug, um die Prozessverteilung zu verstehen. Es muss nachvollziehbar sein, durch welche Station und in welcher Version die Probe gegangen ist. Die Zwischenkontrollen sollten den Fehler erkennen, bevor der nächste Schritt erreicht wird. Das Speichern aller Messwerte an jeder Station kann kostspielig sein, aber es ist auch teuer, kritische Defekte erst bei der letzten Prüfung zu entdecken. Die Kontrollpunkte werden anhand des Ortes, an dem der Defekt entsteht, und der Kosten für die Nichtbeachtung ausgewählt.

Stufe	Beispiel einer Prüfung	Information, die mit dem Eintrag verknüpft werden soll.
Zelleneingang	Leistungsverteilung, EL, Abmessungen	Charge, Klasse, Schneidehistorie
Verbindung	Widerstand, Ausrichtung, mechanische Probe.	Geräte- und Materialversionen
Anordnung	Abstand, Anordnung, Verbindungsintegrität	Produkt-Spezifikation und Toleranzen
Laminierung	Profil, Hohlräume, Begleitprobe zur Haftung	Verkapselungsmaterialcharge und Zyklusprotokoll
Letzter Test	Leistungsprüfung, Elektrolumineszenzprüfung, Isolationsprüfung und optische Inspektion.	Kalibrierung, Annahmeentscheidung.

Die Grenzwerte werden zunächst aus den Produkt- und Testanforderungen abgeleitet. Erweitern Sie die Kontrollgrenze nicht nachträglich, nur damit alle Produkte die Prüfung bestehen. Verdächtige Produkte werden ausgesondert; bei einer Nachbearbeitung bleibt die Prozesshistorie erhalten. Die Auswirkungen einer Materialänderung auf die bestehenden Qualifikationstests werden überprüft. [D21] [D22] [D23]

Übertragungspaket

Die Übergabe einer Modulentwicklung ist nicht nur ein gutes Beispiel. Zellverteilung, Materialliste, Schaltplan, Prozessfenster, Messprotokolle, Fehlerbeispiele und eine Änderungsdokumentation werden zusammen übergeben. Welcher Teil der Rezeptur wurde verifiziert, welcher Teil wurde angenommen? Mit welcher Ausrüstung wurde gearbeitet? Welche Akzeptanzkriterien wurden noch nicht getestet? Wenn diese Fragen offen bleiben, wird das nächste Team das gleiche Problem erneut untersuchen.

Übungsaufgabe. Eine Änderung, die auf Zellebene einen relativen Gewinn von 1 % erzielt, geht in einem Modul verloren. Richten Sie ein gestaffeltes Produktionsversuch ein, um die Erklärungen für Zellschneiden, Verbindung, optische Verkapselung und Laminierungsschäden zu trennen. Wählen Sie an jeder Station eine geeignete Vergleichsprobe aus, um die messbare Leistung und die nicht messbaren Auswirkungen zu bestimmen.

Skalierung: Kapazität, verkaufsfähige Watt und Prozesswirtschaftlichkeit

Nennkapazität ist nicht die tatsächliche Produktion

Nennkapazität ist die potenzielle Produktion unter bestimmten Annahmen bezüglich Geschwindigkeit und Betriebsdauer. **Tatsächliche Produktion** ist die in einem bestimmten Zeitraum produzierte Menge. **Akzeptierte Produktion** ist der Teil, der die Spezifikationen erfüllt. Die **Kapazitätsauslastung** gibt an, welcher Anteil der definierten Kapazität genutzt wird. Wenn die gleiche GW/Jahr-Zahl für eines dieser verschiedenen Konzepte verwendet wird, ist ein direkter Vergleich nicht möglich.

Verfügbarkeit gibt an, welcher Anteil der geplanten Zeit die Anlage in Betrieb ist. Die **Leistungsfähigkeit** beschreibt, wie nah die tatsächliche Geschwindigkeit während des Betriebs an der Nenngeschwindigkeit liegt. Die **Qualitätsrate** ist der Anteil der akzeptierten Produkte. Durch die Multiplikation dieser Werte können wir eine grobe erste Bilanz der Verluste erstellen; für eine detailliertere Modellierung sind jedoch möglicherweise Informationen über Engpässe, Nachbearbeitung und Produktvarianten in der tatsächlichen Anlage erforderlich.

Synthetisches Beispiel: Eine nominale Produktionslinie mit 1000 Zellen/Stunde, bei der 80 % die Verfügbarkeit, 90 % die Geschwindigkeit und 95 % die Akzeptanzrate angibt, ergibt $1000 \times 0,80 \times 0,90 \times 0,95 = 684$ akzeptierte Zellen/Stunde. Wenn jede akzeptierte Zelle 5 W leistet, beträgt die Produktionskapazität 3420 W/Stunde. Dies bedeutet, dass die Fabrik nicht Strom erzeugt, sondern in einer Stunde Produkte mit einer Nennleistung von 3420 W herstellt. Die Einheiten für Leistung und Produktionsrate müssen getrennt betrachtet werden.

Die Zunahme der Fläche verändert die Wahrscheinlichkeit für Defekte

Das Fehlen eines Defekts in einer kleinen Probe bedeutet nicht, dass in einer größeren Fläche keine Defekte vorhanden sind. Die **Defektdichte** ist das Verhältnis der Anzahl definierter Defekte zur Fläche oder zum Volumen. In einfachen Modellen, bei denen Defekte als unabhängig und homogen verteilt angenommen werden, steigt mit zunehmender Fläche die Wahrscheinlichkeit, auf mindestens einen Defekt zu stoßen. In der realen Produktion kann es zu einer Ansammlung und Konzentration in bestimmten Bereichen kommen; diese Annahmen müssen durch Messungen überprüft werden.

Kosten pro akzeptiertem Watt sind das Verhältnis der gesamten Kosten zur akzeptierten Nennleistung. **Fixkosten** sind Kosten, die sich kurzfristig nicht im gleichen Verhältnis wie die Produktionsmenge ändern; **variable Kosten** sind

Inputfaktoren, die von der Produktion abhängen. Ein **Engpass** ist eine Stufe, die den Durchsatz der Produktionslinie begrenzt. Wenn ein Engpass gleich bleibt, führt die Verdopplung der Geschwindigkeit eines anderen Geräts nicht zu einer Verdopplung der Gesamtproduktion. Die Maßstabsvergrößerung beinhaltet nicht nur eine größere Beschichtungsfläche, sondern auch die gleichzeitige Aufrechterhaltung des Durchsatzes und der Akzeptanzrate.

Verständniskontrolle: Der Preis der Chemikalie hat sich halbiert

Werden dadurch auch die Gesamtkosten für die erzeugte Leistung halbiert? Nein. Der Anteil dieses chemischen Stoffes an den Gesamtkosten, sein Verbrauch, die Akzeptanzrate und die übrigen Kosten müssen bekannt sein. Wenn die neue Reinheit außerdem die Akzeptanzrate senkt, kann ein billigerer Ausgangsstoff ein teureres akzeptiertes Produkt ergeben.

Der wirtschaftliche Wert einer Forschungsidee ergibt sich nicht allein daraus, dass ein günstigeres Material verwendet wird. Die Beschichtungsgeschwindigkeit, Produktionsausfälle, die Zielausnutzung, die Qualitätsverteilung, die Wartung und die Produktleistung können sich ändern. Alle numerischen Beispiele in diesem Abschnitt sind synthetisch und sollten nicht als aktuelle Fabrikkosten oder Unternehmensmargen interpretiert werden. Das Ziel ist es, die Berechnungsmethode zu vermitteln, die die Veränderung im Labor mit der Entscheidung zur Maßstabsvergrößerung in Verbindung bringt.

Unterschiedliche Bedeutungen von Kapazität

Die installierte Nennkapazität gibt das jährliche Potenzial einer Produktionslinie unter bestimmten Annahmen an. Die tatsächliche Produktion, die akzeptierten Produkte, die versandten und verkauften Watt-Zahlen sind jedoch unterschiedlich. Die Eröffnung einer Fabrik oder die Bekanntgabe einer Kapazität bestätigt dies nicht alles. Wenn sich die Leistung pro Produkt ändert, ergibt die gleiche Produktionsrate eine andere Watt-Kapazität. Die Zahlen in einem Unternehmensatlas sollten unter Berücksichtigung dieser Unterscheidung interpretiert werden.

Die Kapazität einer Anlage hängt vom Durchsatz zwischen den Stationen ab. In einer seriellen Prozesskette kann der langsamste Schritt zum Engpass werden; parallele Anlagen, Zwischenlager, Chargenöfen und Wartungspläne verändern die einfache Berechnung des minimalen Durchsatzes. Eine Beschichtungsanlage mit hoher Nennleistung liefert nicht den erwarteten Durchsatz, wenn häufige Reinigungen erforderlich sind. Die Beschleunigung einer einzelnen Station führt möglicherweise nicht zu einer Erhöhung des Gesamt-Durchsatzes, wenn der Engpass an anderer Stelle liegt.

Verfügbarkeit, Geschwindigkeit und Qualität

Der OEE-Ansatz hilft dabei, die Komponenten Verfügbarkeit, Leistung und Qualität zu trennen. Damit dies sinnvoll ist, müssen die Nenner konsistent sein. Wenn Qualitätsverluste sowohl in der Geschwindigkeitskomponente als auch in der Akzeptanzrate berücksichtigt werden, kommt es zu einer doppelten Zählung. Es wird auch angegeben, auf welcher Zeitbasis die geplante Stillstandszeit basiert. In diesem Buch ist das folgende Beispiel ein klar definiertes, einfaches Modell:

$$N_{\text{good}} = r_{\text{ideal}} t_{\text{scheduled}} A P Y. \quad (\text{II.14.1})$$

Die ideale Produktionsrate sei 1.000 Stück pro Stunde, die geplante Laufzeit 8.000 Stunden, die Verfügbarkeit 0,85, der Geschwindigkeitsfaktor 0,90 und die Erstaussbeute 0,95. Die erwartete gute Produktionsmenge beträgt 5.814.000 Stück. Wenn jedes akzeptierte Produkt 10 W beträgt, entspricht dies 58,14 MW. Dieses Ergebnis sollte nicht mit der gleichzeitigen Behauptung von 8 Millionen Stück und 95 %-Qualität verwechselt werden. Falls Nacharbeiten erforderlich sind, werden zusätzliche Zeit, Kosten und Akzeptanz separat berechnet.

Kosten je verkaufsfähigem Watt

In einer vereinfachten jährlichen Berechnung werden die fixen und variablen Kosten durch die angenommene Gesamtleistung geteilt. Wenn die Produktklassen unterschiedlich sind, können die Leistung und der wirtschaftliche Wert jeder Klasse separat betrachtet werden. Auch das in dem Schrott enthaltene, wiederverwertbare Material wird unter einer klaren Annahme berücksichtigt. Der Energiepreis, die Nutzungsrate und die Finanzierungsannahmen eines jährlichen Modells sind zeitgebunden.

$$c_W = \frac{C_{\text{fixed}} + C_{\text{material}} + C_{\text{energy}} + C_{\text{labor}} + C_{\text{maintenance}} + C_{\text{quality}}}{W_{\text{good}}}. \quad (\text{II.14.2})$$

Wenn eine Materialänderung die Kosten pro Einheit 2 % senkt, die Produktleistung 1 % reduziert und die Akzeptanzrate 3 % verringert, kann sich die Gesamtwirtschaftlichkeit verschlechtern. Unter Verwendung einfacher Faktoren ergibt sich eine neue Kosten-/Leistungs-Relation von etwa $0,98 / (0,99 \times 0,97) = 1,0205$, was einer Zunahme von etwa 2,05 % entspricht. Selbst die Annahme, dass andere Kosten konstant bleiben, erklärt nicht vollständig eine reale Produktionslinie; das Beispiel zeigt, dass die Einsparungen bei einer einzelnen Komponente möglicherweise nicht ausreichen.

Die Wahrscheinlichkeit für Defekte steigt mit der Fläche

Das Fehlen eines seltenen Defekts in einer kleinen Zelle ist kein Beweis für die Fehlerfreiheit einer größeren Fläche. In einem idealen Modell, in dem unabhängige, gleichwahrscheinliche, tödliche Defekte einem Poisson-Prozess folgen, ist die Wahrscheinlichkeit für eine fehlerfreie Fläche wie folgt:

$$Y_0(A) = \exp(-DA). \quad (\text{II.14.3})$$

Sei D die Dichte tödlicher Defekte pro Flächeneinheit. Synthetisch betrachtet beträgt die Defektdichte für 0,01 Defekte/cm² auf einer Fläche von 1 cm² ungefähr 99,0 %; auf einer Fläche von 100 cm² beträgt sie 36,8 %. In realen Filmen können sich Defekte gruppieren, einige davon sind möglicherweise nicht tödlich, und eine Streifenstruktur oder Reparatur kann wirksam sein. Daher ist dieses Modell keine realistische Schätzung der akzeptablen Rate; es zeigt, warum die Flächenvergrößerung neue Informationen erfordert.

Reduzieren Sie eine Defektkarte nicht auf die mittlere Dichte. Häufungen am Rand, Streifen in Beschichtungsrichtung, wiederkehrende Walzenspuren oder Fehler in Abhängigkeit von der Position auf dem Probenträger weisen auf unterschiedliche Ursachen hin. Fertigungsrichtung und Probenausrichtung gehören in die Datendatei. Eine gute räumliche Karte kann aufschlussreicher sein als eine zufällige Suche nach neuen Rezepturen.

Größen, die bei der Skalierung des Laborrezeptes erhalten bleiben müssen

Es ist nicht immer ausreichend, das Beschichtungsvolumen im gleichen Verhältnis wie die Fläche zu erhöhen. Das Strömungsregime, die Oberflächenspannung, die Verdunstung sowie der Wärme- und Stofftransport ändern sich mit dem Maßstab. Bei der Slot-Die-Beschichtung werden Durchflussrate, Liniengeschwindigkeit und Beschichtungsbreite gemeinsam festgelegt, während die Stabilität des Meniskus und die Trocknungshistorie separat überprüft werden. Unter Vakuum beeinflussen die Form der Quelle und die Bewegung des Substrats die Homogenität der Zusammensetzung. In einem Ofen können die Füllmenge und der Gasfluss die tatsächlichen Bedingungen, denen das Material ausgesetzt ist, verändern.

Aus diesem Grund ist die Angabe „gleiche Temperatur“ bei der Übertragung allein nicht ausreichend. Wo befindet sich der Sensor, mit welcher Geschwindigkeit erwärmt sich die Probe, wie groß ist der Unterschied zwischen der Oberflächentemperatur und der Gehäusetemperatur? Ebenso definieren „gleicher Druck“ und „gleiche Plasmaleistung“ den lokalen Fluss bzw. die Energie der auf die Oberfläche treffenden Teilchen nicht in allen Aspekten. Die Übertragung von Rezepten zwischen verschiedenen Geräten wird zunächst anhand äquivalenter Ausgangskriterien kalibriert.

Lieferung, Wartung und Designänderung

Wenn ein Additiv nur einen einzigen Lieferanten hat, werden dem Produktionsplan Anforderungen an die Reinheit, die Überprüfung alternativer Quellen und eine Losannahmeprüfung hinzugefügt. Wenn ein neues Los eintrifft, wird der Prozess nicht einfach deshalb als gleichwertig akzeptiert, weil der chemische Name identisch ist. Verunreinigungen, Wassergehalt, Partikel und die Lagerhistorie können von Bedeutung sein. In ähnlicher Weise kann das Ziel, eine Änderung der Elektrode, der Pumpe oder der Kammerwand die Qualität der Beschichtung beeinflussen.

Der Wartungsplan umfasst nicht nur die Stillstandkosten. Wenn zwischen der ersten Produktion nach der Reinigung und der letzten Produktion eines Zyklus Qualitätsunterschiede auftreten, wird ein Zeitfenster definiert. Wenn sich die mit dem Produkt in Kontakt stehenden Teile der Anlage ändern, wird eine erneute Konformitätsprüfung mit einer Referenzprobe durchgeführt. Eine Änderung der Messgerätesoftware oder der Analyseversion kann ebenfalls die Ergebnisserie beeinflussen; die Änderungserfassung ist nicht nur auf die physische Rezeptur beschränkt.

Energie-, Material- und Umweltbilanz

Bei der Berechnung der Produktionsenergie wird zwischen der Grenze für interne Prozesse innerhalb der Anlage und der Grenze für den Lebenszyklus, die die Rohstoffproduktion umfasst, unterschieden. Kennzahlen wie Fläche pro Einheit, Watt pro Einheit und Energie über die gesamte Lebensdauer beantworten unterschiedliche Fragen. Ein hoher Wirkungsgrad kann die benötigte Fläche reduzieren, aber zusätzliche Prozesse oder eine geringe Fertigungsausbeute können diesen Vorteil zunichtemachen. Die Umweltauswirkungen des Einsatzes von Dünnschichtmaterialien werden unter Berücksichtigung von Toxizität, Recyclingfähigkeit und Lebensdauer bewertet.

Verwenden Sie im Vergleich denselben Strommix, dieselbe Produktlebensdauer und dieselbe Systemgrenze. Schreiben Sie einer neuen Technologie mit noch unbekannter Lebensdauer keinen Vorteil zu, indem Sie die Garantiedauer einer ausgereiften Technologie annehmen. Stellen Sie die Szenarien getrennt dar; ermitteln Sie durch eine Sensitivitätsanalyse, welche Unbekannte die Entscheidung am stärksten verändert.

Aufgabe: Die neue Beschichtungsmethode ist doppelt so schnell, aber die Häufigkeit der Reinigungen verdoppelt sich und die Akzeptanzrate sinkt. Schreiben Sie zunächst auf, welche Zeiträume gemessen werden sollten. Erstellen Sie dann eine Tabelle, um die Kosten pro Watt in einem optimistischen, einem realistischen und einem pessimistischen Szenario zu berechnen. Wählen Sie abschließend das einzelne Experiment aus, das die wirtschaftliche Unsicherheit am meisten reduziert.

Berechnungsgestützte Entwicklung: Vom potenziellen Material zum testbaren Bauelement

Die Glieder einer Rechenkette

DFT ist eine Methode, die die Energie- und elektronischen Eigenschaften eines Kristalls mithilfe von quantenmechanischen Berechnungen auf der Grundlage der Elektronendichte approximativ bestimmt. Das **optische Modell** berechnet, wie viel Licht in welcher Schicht absorbiert wird. Das **Bauelementmodell** analysiert die Bewegung, den Verlust und die Kontakte der erzeugten Ladungsträger, um das Strom-Spannungs-Verhalten zu ermitteln. Das **Produktionsmodell** stellt die Beziehung zwischen Prozessgeschwindigkeit, Akzeptanz und Verbrauch her. Ein gutes Ergebnis in einem einzelnen Schritt bedeutet nicht, dass die gesamte Kette validiert ist.

Eingangunsicherheit bezeichnet die unvollständige Kenntnis der verwendeten Parameter. **Modellfehler** entstehen, wenn die Annäherung das reale physikalische System nicht vollständig abbildet. **Numerischer Fehler** resultiert aus der numerischen Lösung des gewählten Modells mit endlicher Auflösung auf einem Computer. Diese drei Fehlerarten müssen voneinander unterschieden werden. Ein dichteres Rechengitter kann den numerischen Fehler reduzieren, fügt dem Modell aber nicht automatisch fehlende chemische Reaktionen hinzu.

Warum sind Stabilität und Bandlücke getrennte Auswahlkriterien?

Ein Kristall kann Licht bei einer geeigneten Energie absorbieren, neigt aber möglicherweise dazu, sich in andere Verbindungen mit geringerer Energie aufzuspalten. Eine **Phase** ist ein Zustand mit einer bestimmten Struktur und Zusammensetzung. Ein **konkurrierender Phasenraum** besteht aus den Möglichkeiten, die gleichen Gesamtelemente mit anderen Verbindungsgemischen zu bilden. Die Berechnung der **konvexen Hülle** legt deren Energiegrenze fest. **Metastabil** ist ein Zustand, der zwar nicht die absolut niedrigste Energie besitzt, aber aufgrund von Barrieren, die der Umwandlung entgegenstehen, bestehen kann. Wie lange dies andauert, lässt sich nicht allein aus der Energiedifferenz ableiten.

Synthetisches Beispiel: Ein Bauelementmodell liefere bei einer Ladungsträgerlebensdauer von 1 ms einen Wirkungsgrad von 28% und bei 1 μ s einen Wirkungsgrad von 14%. Bei einem noch nicht vermessenen Material wäre es irreführend, 1 ms anzunehmen und 28% als „vorhergesagten tatsächlichen

Wirkungsgrad“ darzustellen. Das Ergebnis zeigt, dass die Lebensdauer entscheidend ist und gemessen werden muss. Bei der Auswahl des Kandidaten sind die Bedingungen zu untersuchen, unter denen er Vorteile oder Nachteile aufweist, statt nur den optimistischen Punkt zu wählen.

Screening dient dazu, eine große Anzahl von Kandidaten anhand kostengünstiger Regeln auszusortieren; **Validierung** besteht darin, die kritischen Annahmen der verbleibenden Kandidaten mithilfe robusterer Methoden oder Experimente zu überprüfen. **Identifizierbarkeit** bedeutet, dass die gemessenen Daten in der Lage sind, verschiedene Modellparameter eindeutig zu bestimmen. Beim **aktiven Lernen** wird die nächste Berechnung anhand des Informationsgewinns oder des Beitrags zum Ziel ausgewählt. Diese Methoden können das Denken beschleunigen, machen aber unbekannte Grenzflächen und Syntheseverhalten nicht automatisch bekannt.

Verständniskontrolle: Was genau soll im Labor gemessen werden?

Bestimme den Parameter, der das Ergebnis des Modells am stärksten beeinflusst und dessen aktueller Wertebereich am unsichersten ist. Wenn er angemessen messbar ist, ist er ein guter Kandidat für das erste Experiment. Allein die Wahl der teuersten oder neuesten Messmethode liefert möglicherweise nicht die Informationen, die die Entscheidung am stärksten beeinflussen.

Die Berechnung hilft dabei, zu bestimmen, welche Experimente der Untersuchung es wert sind, durchgeführt zu werden. Im Gegenzug kann eine Bandlücke oder ein theoretischer Wirkungsgrad eine synthetisierte und gemessene Zelle nicht ersetzen. In der Entwicklungskette ist die Ausgabe jedes Modells die Eingabe für die nächste Stufe; auch der Modellfehler wird übertragen. Dieser Abschnitt wandelt die DFT-, Transport- und Machine-Learning-Abschnitte des ersten Buches in ein Programm um, bei dem Entscheidungslogik implementiert wird.

Wandeln Sie zunächst die Produktfrage in eine Berechnungsfrage um

„Ein neues PV-Material finden“ ist eine sehr weit gefasste Aufgabe. Sinnvollere Fragen wären: Gibt es einen breitbandigen Absorber, der bei einer bestimmten Temperaturbedingung hergestellt werden kann? Gibt es eine Grenzfläche, die die Bandausrichtung des vorhandenen Kontakts verbessert? Gibt es eine chemische Bedingung, die die Entstehung eines Defekts reduziert? Wenn die Frage präziser formuliert ist, können auch die erforderliche Genauigkeit und die kostengünstigste Analysemethode bestimmt werden.

Die Kandidatenliste wird nicht ausschließlich nach dem theoretischen Wirkungsgrad sortiert. Die Verfügbarkeit der Elemente, mögliche Phasen, chemische Stabilität, optische Absorption, Transport, Defekte und die Prozesskompatibilität werden

gemeinsam bewertet. Wenn in einigen Bereichen Informationen fehlen, füllen Sie das leere Tabellenfeld nicht mit einer optimistischen Annahme. Unbekannte Aspekte werden als Thema für weitere Untersuchungen notiert. Wenn es aufgrund von Ressourcenbeschränkungen nicht möglich ist, konkurrierende Phasen zu untersuchen, wird anstelle der „allgemeinen Stabilität“ der Umfang des untersuchten Bereichs angegeben.

Berechnungseinrichtung und Konvergenz

Die Kristallstrukturquelle, die Atomtypen, der magnetische Zustand, die Funktionalität, das Pseudopotenzial, die Abschneideenergie, das k-Netz und die Relaxationstoleranzen werden gespeichert. Die Konvergenz der Gesamtenergie muss genauer sein als die angestrebte Energiedifferenz. Die Konvergenz in einer einzelnen Struktur ist möglicherweise nicht ausreichend; die verglichenen Phasen müssen mit konsistenten Einstellungen berechnet werden. Wenn sich die Einheitszelle ändert, wird anstelle der Anzahl der k-Punkte die Abtastdichte im reziproken Raum betrachtet.

Eine Energiedifferenz von 5 meV/Atom führt bei einer numerischen Unsicherheit von 20 meV/Atom nicht zu einer starken Ordnung. Bevor auf eine teurere Methode umgestellt wird, wird die Konvergenz innerhalb derselben Methode überprüft. In der kostengünstigen Voruntersuchung werden Kandidaten ausgewählt; die Phase mit höherer Genauigkeit wird nur auf die ausgewählten Kandidaten angewendet. Negative Ergebnisse, fehlgeschlagene Relaxationen und unterschiedliche Ausgangszustände werden gespeichert; nur die besten Endstrukturen werden nicht archiviert.

Thermodynamische Stabilität und Synthetisierbarkeit

Eine Bildungsenergie gibt den Zustand einer Verbindung in Bezug auf ihre Elemente an. Um die Dissoziation in konkurrierende Verbindungen zu beurteilen, ist die untere Energiehülle im Phasenraum erforderlich. Die Dokumentation des Materials Project erläutert, wie die Energie oberhalb der Hülle in Bezug auf stabile Phasen-Kombinationen definiert wird. Diese Bewertung hängt von dem gewählten Energiemodell und dem Phasensatz ab. [\[D24\]](#)

Eine Energie von null oberhalb der konvexen Hülle garantiert nicht automatisch die Synthese. Entropie bei endlicher Temperatur, chemische Potentiale, Oberflächen und Grenzflächen, kinetische Barrieren und der Wachstumspfad verändern das Ergebnis. Auch eine Phase oberhalb der Hülle kann unter geeigneten kinetischen Bedingungen metastabil existieren. Die Aussage „kann metastabil sein“ darf jedoch nicht zur Rechtfertigung jedes hochenergetischen Kandidaten dienen. Die jeweiligen Wachstums- und Abbaumechanismen werden gesondert untersucht.

Synthetisches Beispiel. Nehmen wir an, ein Kandidat befindet sich in einem begrenzten Phasenraum, wobei seine Hüllenergie 15 meV/Atom beträgt. Wenn eine neu entdeckte konkurrierende Phase die Hüllenergie um 20 meV/Atom senkt, beträgt

die Differenz des Kandidaten 35 meV/Atom. Obwohl sich die Eigenenergie des Kandidaten nicht ändert, ändert sich die Interpretation der Stabilität. Daher sollte das Ergebnis-Paket nicht nur die Kandidatenstruktur, sondern auch die Liste der konkurrierenden Phasen und deren Energieprofile enthalten.

Bandlücke und optische Leistung

Die elektronische Bandlücke und der Beginn der optischen Absorption sind nicht unter allen Bedingungen identisch. Direkte oder indirekte Übergänge, der Exiton-Effekt, erlaubte Übergänge und die Temperatur spielen eine Rolle. Das Hinzufügen einer konstanten Korrektur zu einer DFT-Bandlücke auf niedriger Ebene führt nicht bei allen Materialien zu der gleichen Genauigkeit. Wenn hybride Funktionale oder fortgeschrittenere Methoden verwendet werden, wird der Konvergenz- und Vergleichsbereich angegeben.

Eine Schätzung des optischen Wirkungsgrades beinhaltet Annahmen über die Absorberdicke, die Absorption und die Rekombination. Ein hohes Ergebnis im idealen strahlenden Modell beseitigt reale Kontakt- und Defektverluste nicht. Die Aussage „Potenzial unter den folgenden Annahmen im Modell“ und der „gemessene Zellwirkungsgrad“ sollten in separaten Zeilen stehen. In dem ersten Experiment sollte nicht das Erreichen des gesamten idealen Wirkungsgrads angestrebt werden, sondern vielmehr der Nachweis, dass der grundlegende Absorptions- und Sammlungsprozess funktioniert.

Defektrechnung: Neben der Konzentration ist auch die Fangwahrscheinlichkeit von Bedeutung

Die Defektbildungsenergie hängt vom Atomaustausch, dem Ladungszustand, dem Fermi-Niveau und den endlichen Zellkorrekturen ab. Die chemischen Potentiale müssen innerhalb der physikalischen Phasengrenzen ausgewählt werden. Für geladene Defekte werden die Zellgröße und die elektrostatischen Korrekturen kontrolliert. Der Übergangspegel gibt an, bei welchem Fermi-Niveau ein Defekt seinen Ladungszustand ändert; er liefert nicht allein die Ladungsträger-Einfangrate.

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Defekt in einer Solarzelle eine Auswirkung hat, ist eine Kombination aus dem elektronischen Niveau und der Fangdynamik. Ein seltenes, starkes Fangzentrum kann von Bedeutung sein; ein häufiges, flaches Defektzentrum kann sich anders verhalten. Bei der Bewertung einer negativen Auswirkung stellt sich die Frage, ob der Defekt überhaupt nicht auftritt, ob er elektronisch unschädlich ist oder ob das untersuchte Modell den Fangprozess nicht berücksichtigt. Diese Unterscheidung ist für die Entscheidung, die Synthesebedingungen zu ändern, erforderlich.

Bauelementmodell und Parameteridentifizierbarkeit

Werkzeuge wie SCAPS können verwendet werden, um die Transporteigenschaften, Defekte und Grenzflächeneffekte in schichtweisen Bauelementen zu untersuchen. Die offizielle Webseite des Programms verlinkt zu den Quellen für das Basismodell und den Algorithmus. Die Tatsache, dass eine Software Ergebnisse liefert, bedeutet nicht, dass die eingegebenen Materialparameter korrekt sind. [D25]

Eine einzelne J-V-Kurve kann durch die Kombination vieler Parameter erklärt werden. Mobilität, Lebensdauer, Dotierstoffkonzentration, Kontaktbarriere und Widerstand können sich gegenseitig teilweise beeinflussen. Daher wird das Modell nicht nur an eine einzelne Kurve angepasst. Es wird anhand verschiedener Bestrahlungs- und Temperaturwerte, Dunkelkurven, EQE-Messungen und unabhängigen Dicken-/optischen Messungen getestet. Die gemessenen Parameter werden so weit wie möglich fixiert; die verbleibenden Parameter werden mit ihren jeweiligen Konfidenzintervallen angegeben.

Wenn sich das Ergebnis ändert, wenn das Netz verfeinert wird, wird zunächst der numerische Fehler behoben, bevor die physikalische Interpretation vorgenommen wird. Die Genauigkeit der Randbedingungen und der Vorzeichen wird anhand eines einfachen, bekannten Beispiels überprüft. Wenn die untersuchte Zelle ionische Übergänge aufweist, sollte nicht erwartet werden, dass allein ein statisches elektronisches Modell die Hysterese erklären kann. Das Verbergen des im Modell nicht enthaltenen Mechanismus in einem Anpassungsparameter liefert keine Erklärung.

Auswahl von Experimenten mithilfe von maschinellem Lernen

Wenn in einem Datensatz Varianten derselben Probe sowohl der Trainings- als auch der Testseite zugeordnet werden, kann es zu Datenlecks kommen. Ähnliche Zusammensetzung oder die Verwendung von Proben aus derselben Laborcharge führen bei einer zufälligen Aufteilung der Daten zu übermäßig optimistischen Ergebnissen. Die Aufteilung sollte auf die Forschungsfrage abgestimmt sein: Die Generalisierung auf eine neue Chemie, eine neue Charge oder eine neue Ausrüstung sind separate Aufgaben. Der Testdatensatz wird vor der Modellauswahl und der Auswahl der Hyperparameter geschützt.

Beim aktiven Lernen muss das nächste Experiment nicht unbedingt die Auswahl der besten Vorhersage beinhalten. Ein Experiment, das die Unsicherheit reduziert, kann ebenfalls wertvoll sein. Wenn die Modellunsicherheit jedoch nicht gut kalibriert ist, kann ein hoher Unsicherheitswert dazu führen, dass physisch unsinnige Bereiche ausgewählt werden. Zuerst werden die Anwendbarkeitsgrenzen, dann der Informationsgehalt und die erwartete Leistung zusammen bewertet. Fehlgeschlagene Synthesen sollten nicht aus der Datenbank entfernt werden, da sie die Grenze des anwendbaren Bereichs aufzeigen.

Übergang zur Durchführung des Experiments

Für einen bestimmten Kandidaten muss das Transferpaket die folgenden Fragen beantworten: Welche Eigenschaft wurde mit welcher Methode berechnet? Welcher Konvergenztest wurde durchgeführt? Welche konkurrierenden Erklärungen wurden ausgeschlossen? Welches Ergebnis ist noch eine Hypothese? Welches falsifizierbare Vorhersage wird im ersten Experiment getestet? Das erste Experiment sollte kostengünstig und aussagekräftig sein. Wenn beispielsweise keine Phasenbildung stattfindet, kann es verfrüht sein, mit der Optimierung der Zelle fortzufahren. Wenn sich eine Schicht bildet, wird zunächst eine erste optische und elektrische Validierung durchgeführt, gefolgt von der Kontaktierung und Verpackung.

Aufgabe. Das Modell sagt einen hohen Wirkungsgrad voraus, doch die erste Zelle liefert nur einen schwachen Photostrom. Listen Sie Modellfehler, Phasenverunreinigungen, schlechte Kontakte und eine kurze Lebensdauer als mögliche Erklärungen auf. Geben Sie an, welche davon sich mit den zwei kostengünstigsten Messungen unterscheiden lassen. Stufen Sie den Kandidaten ohne ein neues Experiment nicht als „Entdeckung“ oder „erfolgreiche Zelle“ ein.

Firmenübersicht: Welche Technologie wird von wem in welchem Reifegrad entwickelt?

Das Unternehmensverzeichnis von Produktwerbung abgrenzen

In diesem Abschnitt werden Unternehmen nicht anhand einer Rangliste bewertet, die sich auf die Frage „Wer ist besser?“ konzentriert, sondern anhand der angewandten technischen Verfahren und der dafür vorgelegten Nachweise. Der **Zellenhersteller** produziert den effizienten elektrischen Wandler. Der **Modulhersteller** kann Zellen verbinden und verpacken; er muss die Zellen nicht selbst herstellen. Der **Waferhersteller** wandelt den Kristall in dünne Scheiben um. Der **Ausrüstungslieferant** stellt die Geräte für diese Prozesse bereit. **Vertikale Integration** bedeutet, dass mehrere Stufen der Wertschöpfungskette in einem Unternehmen zusammengefasst sind. Wenn ein Unternehmen „Solarmodule herstellt“, bedeutet das nicht, dass es alle diese Stufen selbst durchführt.

Ein **kommerzielles Produkt** ist ein definiertes, Kunden angebotenes Produkt. Die **Pilotproduktion** dient dem Prozesstransfer und dem Lernen bei der Skalierung. Ein **Laborrekord** ist das Ergebnis einer bestimmten Probe unter bestimmten Bedingungen. Ein **Kapazitätsziel** ist ein Zukunftsplan; die **installierte Kapazität** bezeichnet die definierte Produktionsmöglichkeit einer Anlage; **Auslieferungen** bezeichnen die Menge bereits versandter Produkte. Diese Begriffe sind nicht austauschbar, nur weil im selben Satz eine Zahl in GW vorkommt.

Kommerzielle Bezeichnungen in physikalische Fragestellungen übersetzen

TOPCon beschreibt den passivierten Kontaktansatz mit einer dünnen Oxidschicht und dotiertem Silizium; **HJT** bezieht sich auf den Heteroübergang zwischen kristallinem und anderem Silizium; **BC** bezeichnet die Anordnung der Kontakte auf der Rückseite. Die von Unternehmen verwendeten Bezeichnungen wie HPBC, ABC, TNC oder ähnliche können Handelsnamen für bestimmte Produkt- und Prozessfamilien sein. Daraus lassen sich keine nicht offengelegten Schichtdicken oder geheimen Produktionsrezepte ableiten. Die öffentlich zugänglichen Informationen beschränken sich auf die darin enthaltenen Details.

Synthetisches Beispiel zur Nachrichtenlektüre: Eine Meldung laute: „Eine 1-GW-Linie wurde eröffnet und an einer Zelle wurden 30% Wirkungsgrad gezeigt.“ Dies belegt nicht, dass jährlich Module mit 30% Wirkungsgrad und insgesamt 1 GW

Leistung verkauft werden. Das Produkt, auf das sich die Linienkapazität bezieht, die Kategorie der Wirkungsgradmessung hinsichtlich Zelle oder Modul und Fläche, die unabhängige Bestätigung, die tatsächliche Produktion und die Auslieferungen sind getrennt zu prüfen. Diese Unterscheidung ist insbesondere bei sich entwickelnden Tandemtechnologien entscheidend.

Die in diesem Atlas enthaltenen Unternehmensbeschreibungen sind **auf dem Stand der Daten vom 8. September 2026**. Sie sollten nicht als eine stets aktuelle Liste des aktuellen oder zukünftigen kommerziellen Zustands betrachtet werden. Ziel dieses Abschnitts ist es, zu vermitteln, wie die öffentlich zugänglichen Aussagen von Unternehmen in technische Mechanismen und Reifegradstufen übersetzt werden können. Bei einer Kauf- oder Kooperationsentscheidung werden zusätzlich das aktuelle Datenblatt und die Nachweise des betreffenden Produkts überprüft.

Verständniskontrolle: Schreiben Sie fünf Zeilen über ein Unternehmen

Rolle in der Wertschöpfungskette, Technologie, Maßstab des angebotenen Produkts, Art des Nachweises und Datum der Mitteilung. Wählen Sie eine Methode nicht allein nach der Marke oder einer Rekordzahl, bevor diese fünf Zeilen ausgefüllt sind. Auch „nicht offengelegt“ ist ein dokumentierbares Ergebnis; ergänzen Sie den nicht offengelegten Prozess nicht durch Annahmen.

Dieser Atlas basiert auf ausgewählten Primärquellen, die am 8. September 2026 abgerufen wurden. Unternehmen lassen sich nicht auf eine einzige Technologie reduzieren; die folgenden Karten beschreiben das untersuchte Produkt oder die untersuchte Entwicklungslinie. Die Liste ist keine vollständige Erfassung aller globalen Hersteller und stellt keine Investitions- oder Kaufempfehlung dar. Ziel ist es, die technischen Ansätze anhand konkreter Unternehmensbeispiele zu verstehen und die Unternehmensbeschreibungen in Forschungsfragen zu übersetzen.

Auf jeder Karte sind die in der Quelle verifizierten Informationen und die in diesem Buch enthaltene Forschungsinterpretation getrennt aufgeführt. Die eigene Erklärung des Unternehmens wird als Unternehmensauskunft bezeichnet. Wenn angegeben wird, dass ein unabhängiges Zertifikat vorliegt, ist der genaue Messumfang von besonderer Bedeutung. Eine kommerzielle Zelle, ein Pilotmodul, eine zertifizierte Forschungszelle, die angegebene Kapazität und die jährliche Auslieferungsmenge sind nicht unbedingt Indikatoren für den gleichen Reifegrad. Das Erstellungsdatum der Quelle wird nicht mit dem Zugriffsdatum verwechselt.

In Silizium gibt es drei verschiedene Achsen

TOPCon und HJT beschreiben einen Ansatz für selektive Kontakte und Passivierung von Ladungsträgern. Der Rückkontakt stellt eine architektonische Achse in Bezug auf die Anordnung der Kontakte dar. Die Bezeichnung eines Unternehmens als „BC“-Produkt erklärt nicht die gesamte Schichtchemie. Wafergröße, Schnitt, Metallisierung, beidseitige Auslegung und Modulverbindung können innerhalb dieser Produktfamilien variieren. Es ist irreführend, die kommerziellen Namen von Unternehmen zu vergleichen, ohne sie in grundlegende physikalische Begriffe zu übersetzen, da dies zu falschen Analogien führen kann.

Unternehmen oder Gruppe	Der untersuchte Weg.	Methode zum Auslesen des Nachweises.
LONGi; AIKO	Produktfamilien für Rückkontakte	Trennen Sie die Anordnung von der Kontaktphysik.
JinkoSolar; Trina; JA Solar; Tongwei	TOPCon-Entwicklung und -Produkte	Die Innovation des Rezeptes ist von der Produktionsverteilung zu trennen.
REC; Huasun	HJT-Zellen-/Modul-Konzept	Betrachten Sie Schicht, TCO und Kontakt gemeinsam.
First Solar	CdTe-Dünnschicht	Kommerzielle Linie und Übergang zu einem neuen Prozess unterscheiden
Oxford PV; Qcells; GCL; Swift Solar	Tandem-/Perowskit-Ausrichtungen.	Lieferung, Pilotprojekt, Kapazität und Plan getrennt betrachten.
Heliatek	Organische Dünnschicht	Untersuchen Sie die anwendungsspezifischen Produktanforderungen.
Kalyon PV; Smart Güneş; CW Enerji	Produktion und Integration in der Türkei.	Die Phasen Zelle, Modul und Anlage voneinander trennen.

LONGi: HPBC- und Rückkontaktdesign-Integration

Aussage der Quelle: LONGIs Vorstellung von HPBC 2.0 und Hi-MO X10 im Jahr 2024 verknüpft den Ansatz der Rückseitenkontakte mit der Produktfamilie von Zellen und Modulen. Dies ist eine Produktankündigung eines Unternehmens; es wird nicht davon ausgegangen, dass alle Details der kommerziellen Bezeichnung offengelegt werden.

[C01]

Interpretation der Forschungsergebnisse. Bei der Untersuchung dieses Ansatzes sollten Sie die Vorderseitenschattenreduktion zusammen mit den Kosten für die Handhabung und Ausrichtung des Musters auf der Rückseite berücksichtigen. Eine „sauberere Vorderseite“ kann ein physikalischer Vorteil sein; der tatsächliche Produktgewinn hängt jedoch vom Licht auf der Rückseite, der Temperatur, dem

Schneidprozess und der Modulverbindung ab. Ein Vergleichsexperiment sollte den optischen Gewinn und den elektrischen Verlust unter Verwendung desselben Wafer und unter identischen Messbedingungen trennen. Die gewünschten Daten sind nicht nur der höchste Wirkungsgrad, sondern auch die Verteilung innerhalb der Charge, die Toleranz des Musters auf der Rückseite und die Leistung nach der Modulherstellung.

AIKO: Die ABC-Produktsprache in die Sprache der Physik übersetzen

Aussage der Quelle: Die offizielle Technologie-Seite von AIKO präsentiert die ABC-Rückkontakt-Produktlinie und die technologische Entwicklung. Die auf der Seite genannten Rekorde und Produktangaben sind im Zusammenhang mit ihren jeweiligen Datums- und Messkategorien zu interpretieren. [C02]

Interpretation der Forschung. Versuchen Sie nicht, aus dem ABC-Label eine vollständige Zellrezeptur abzuleiten. Für die Forschung sind folgende Fragen von Bedeutung: Wie werden die selektiven Bereiche getrennt, wie werden die Kontakte und die Passivierung geschützt und welche Verluste entstehen durch Musterfehler? Bei einer Änderung der Zellgröße innerhalb derselben Architektur ändern sich auch die Transportwege und die mechanischen Toleranzen. Daher ist bei der Umstellung von einem kleinen Prototyp auf eine größere Zelle ein Flächenskalierungsexperiment erforderlich.

JinkoSolar: TOPCon-Upgrade und Kapazitätsziel

Aussage der Quelle: In der Bekanntmachung der Ergebnisse für das zweite Quartal 2026 von JinkoSolar wird der Übergang zu TOPCon 3.0 und das Ziel einer Produktionskapazität von über 40 GW bis zum Jahresende genannt. Zum Zeitpunkt dieser Aussage kann nicht angegeben werden, dass das Jahresendziel in Form einer realisierten Produktion erreicht wurde. [C03]

Interpretation der Forschungsergebnisse. Der Wert einer Technologieversion wird daran gemessen, welcher physikalische Verlust reduziert wurde. Wenn eine neue Passivierung, ein neuer Kantenbearbeitungsprozess oder eine neue Metallisierung vorhanden ist, sollten deren Beiträge separat gemessen werden. Eine reine Kapazitätserhöhung zeigt nicht unbedingt die Verteilung der Zellqualität. Um die Produktentwicklung zu bewerten, sind die Ergebnisse von Zellen/Modulen mit der gleichen Größe, Flächendefinition und unter den gleichen Testbedingungen erforderlich, vorzugsweise zusammen mit dem Produktionsmedian und dem unteren Ende der Verteilung.

Trina Solar: Von der TOPCon-Zelle zum Modulprodukt

Aussage der Quelle: Trinas Ankündigung der TOPCon Ultra-Technologie verknüpft die technologische Weiterentwicklung mit der weltweiten Produktlieferung. Die Produktnamen und Leistungsangaben des Unternehmens beziehen sich auf die jeweilige Produktversion. [C04]

Interpretation der Forschungsergebnisse. Die Leistung der Zelle kann sich durch den Zuschnitt, die Verbindung und die Verkapselung im Modul verändern. Eine technische Analyse sollte die Leistungsverteilung, die bei der Zellproduktion entsteht, mit der Modul-CTM-Bilanz in Beziehung setzen. Wenn ein neuer Rand- oder Kontaktaufbau behauptet wird, kann ein Vergleich vor und nach dem Zuschnitt ein aussagekräftigeres erstes Experiment sein als ein vollständiger Modultest. Wenn Systemenergiedaten vorliegen, sollten auch Standort-, Hintergrundbeleuchtungs- und Temperaturbedingungen angefordert werden.

JA Solar: Bycium+ und DeepBlue Produktreihe

Aussage der Quelle: Im Geschäftsbericht 2024 von JA Solar werden der Bycium+-n-Typ-Zellansatz und die DeepBlue-Produktentwicklungen Anfang 2025 behandelt. Der Berichtszeitraum und das Veröffentlichungsdatum werden getrennt angegeben. [C05]

Interpretation der Forschungsergebnisse. Es ist notwendig, die Beziehung zwischen der Zellmarke und der Modulfamilie zu verfolgen; dieselbe kommerzielle Familie kann im Laufe der Zeit unterschiedliche Leistungsklassen und Komponenten umfassen. Die zu untersuchende Dokumentation sollte die Zellarchitektur, das Wafer-/Flächenverhältnis, die Verbindung, das Verkapselungsmaterial und die Messversion in derselben Tabelle zusammenfassen. Andernfalls könnten die Zellrekorde eines Jahres fälschlicherweise mit den Produktdatenblättern eines anderen Jahres kombiniert werden.

Tongwei: TNC und Prozessinterventionen

Aussage der Quelle. Tongweis TNC 3.0-Ankündigung vom 5. Juni 2026 hebt Prozessbestandteile wie Randpassivierung, strukturierte polykristalline Siliziumschichten und Druckverfahren hervor. Dies sind die Technologieaussagen des Unternehmens. [C08]

Interpretation der Forschungsergebnisse. Bei der Bewertung eines solchen, aus vielen Komponenten bestehenden Pakets ist es erforderlich, jede Neuerung separat zu betrachten. Für die Randpassivierung werden sowohl geschnittene als auch ungeschnittene Proben verwendet; für die Strukturierung von polykristallinem Silizium werden optische Verluste und Kontaktmessungen durchgeführt; für den Druck werden die Linienmorphologie und der Widerstand verglichen. Die Beobachtung einer

hohen Leistung im Gesamtpaket bedeutet nicht, dass jeder Schritt einen unabhängigen Vorteil für jede Zellkonstruktion bietet.

REC: HJT-basierte Alpha Pure-RX

Aussage der Quelle: Die Produktseite „Alpha Pure-RX“ von REC beschreibt die HJT-Zellmodul-Familie, die Verbindungsanordnung und die Produkteigenschaften. Das technische Datenblatt zum Zeitpunkt des Zugriffs bezieht sich auf eine bestimmte Produktversion. [C06]

Interpretation der Forschungsergebnisse. Untersuchen Sie den Einfluss der Zellphysik von HJT auf die Modulverbindung. Die Widerstandsfähigkeit eines Produkts gegen einen bestimmten Abbauprozess bedeutet nicht, dass alle Leistungsverluste eliminiert werden. Ein Vergleich der Entwicklung sollte die anfängliche Leistung, das Temperaturverhalten, die Verbindung und die Ergebnisse der Alterungsprüfung umfassen. Die Garantiebedingungen für ein Produkt sollten nicht anstelle eines physikalischen Modells der Lebensdauer verwendet werden.

Huasun: Ganzheitlicher HJT-Prozess

Was der Hersteller angibt. Huasun beschreibt auf den offiziellen Produkt- und Prozessseiten die HJT-Zellen-/Modulproduktion sowie die Wafer-Reinigung, -Texturierung, Dünnschicht-, TCO- und Metallisierungsprozesse. Die vier Hauptgruppen im Marketing bedeuten nicht, dass es tatsächlich nur vier Prozesse gibt. [C07] [D09]

Interpretation der Forschungsergebnisse. Bei der Entwicklung von HJT-Zellen kann die Vorgeschichte der Oberflächenbehandlung, d. h. der Übergang von einem Prozessschritt zum nächsten, entscheidend sein. Daher sind Zwischenwartezeiten, die Umgebung und Plasmabeschädigung separate Forschungsthemen. Anstatt das TCO ausschließlich anhand seiner hohen Transparenz auszuwählen, sollte es zusammen mit dem Widerstand, der Selektivität und dem Metallkontakt bewertet werden. Ein Niedertemperaturprozess kann ein Vorteil sein; die entsprechenden Kontakt- und Verpackungsmaterialien müssen jedoch ebenfalls validiert werden.

First Solar: Kommerzielles CdTe und Übergang zu einem neuen Verfahren

Aussage der Quelle: Der Jahresbericht 2025 von First Solar beschreibt die CdTe-basierten Produkte der Serie 6/7 und den für 2026 geplanten Übergang zum CuRe-Verfahren. Der im Bericht dargestellte Zeitplan für den zukünftigen Übergang wird nicht als vollständig abgeschlossen in allen Fabriken präsentiert. Die Perowskit-Forschungsaktivitäten fallen ebenfalls nicht in die gleiche Kategorie wie die kommerzielle CdTe-Produktion. [C09]

Interpretation der Forschungsergebnisse. Dieses Beispiel zeigt, dass eine neue Entwicklung im Bereich der Photovoltaik nicht unbedingt den vollständigen Austausch des Absorbers erfordert. Die Modifikation eines bestehenden Produkts durch Dotierung, Veränderung der Grenzfläche oder des Kontakts kann eine vielversprechende Entwicklungsstrategie darstellen. Die Forschungsfrage des Forschers ist, wie der neue Prozess eine Verbesserung der Spannung und der Beständigkeit erzielt, mit welcher bestehenden Ausrüstung er kompatibel ist und wie sich die Akzeptanzrate während der Übergangsphase verändert.

Oxford PV: Erste kommerzielle Auslieferung von Tandemzellen

Aussage der Quelle: Oxford PV gab am 5. September 2024 die erste kommerzielle Auslieferung von Perowskit-Silizium-Tandemmodulen bekannt. Diese erste Auslieferung ist eine Unternehmensmitteilung, die den Übergang der Technologie in die Produktphase signalisiert; sie definiert jedoch nicht allein das hohe jährliche Produktionsvolumen. [C10]

Interpretation der Forschungsergebnisse. Bei der Untersuchung dieses Ansatzes werden die folgenden Aspekte separat betrachtet: Zellrekord, Modulfläche, stabile Leistung, Produktionsverteilung und die Bedingungen des ausgelieferten Produkts. Wenn der Tandemgewinn in jährliche Energie umgerechnet werden soll, sind die spektrale Verteilung und die Temperatur von Bedeutung. Es sollte nicht davon ausgegangen werden, dass der optische Aufbau des Forschungsprototyps und die Verpackungsstruktur des ausgelieferten Produkts äquivalent sind.

Qcells: Pilotmodul und Stabilitätsnachweis

Aussage der Quelle: Die im Mai 2025 veröffentlichte Erklärung von Qcells beschreibt einen wichtigen Meilenstein in Bezug auf die Tests im Rahmen der IEC/UL 61215-2-Norm für Tandem-Pilotmodule im M10-Format. Der angegebene Erfolg bei den Tests bedeutet nicht automatisch eine Lebensdauer von dreißig Jahren im Feld oder eine vollständige, weitverbreitete Serienproduktion. [C11]

Interpretation der Forschungsergebnisse. Das Pilotmodul liefert im Vergleich zu einer kleinen Zelle mehr Informationen über die Fläche und die Verpackung. Dennoch sind eine größere Anzahl von Proben, eine Testreihe, eine Vorbehandlung und stabile Leistungsergebnisse nach dem Test erforderlich. Die sequenzielle Anwendung mehrerer Belastungen auf derselben Probe führt zu anderen Ergebnissen als die Anwendung einer einzelnen Belastung auf separaten Proben.

GCL: Perowskit-Produktionsstandort und tatsächliche Produktion unterscheiden

Aussage der Quelle: GCL gab am 24. Juni 2025 bekannt, dass die Produktionsstätte für Perowskit-Solarzellen in Betrieb genommen wurde und eine Kapazität im Gigawatt-Bereich angestrebt wird. Die auf dem Typenschild angegebene Kapazität beweist nicht, dass tatsächlich die angegebene Menge an qualitativ hochwertigen Produkten innerhalb eines Jahres produziert und verkauft wird. [C12]

Interpretation der Forschungsergebnisse. Bei der Bewertung der Skalierbarkeit sollten die Homogenität über eine große Fläche, die Laserverbindungsverluste, die Verpackung, die Akzeptanzrate und die Stillstandzeiten gemeinsam betrachtet werden. Die nützlichsten Daten, die untersucht werden sollten, sind manchmal nicht die höchste Modulleistung, sondern die Akzeptanzrate beim ersten Durchgang und die Defektkarte über die Zeit. Wenn diese Daten nicht öffentlich zugänglich sind, wird dies explizit erwähnt.

Swift Solar: HJT-Grundlage und Tandemplan

Aussage der Quelle: In einer Erklärung vom 12. März 2026 teilte Swift Solar mit, dass Meyer Burger bestimmte Produktionsanlagen und geistiges Eigentum im Bereich der HJT-Technologie erwerben wird, und erläuterte die Pläne für die Siliziumproduktion und die anschließende Entwicklung von Tandemzellen in den USA. Der Erwerb der Anlagen ist bereits abgeschlossen; die Pläne für die zukünftige Fabrik und den Zeitplan für die Tandemzellenentwicklung sind separate Vorhaben. [C13]

Interpretation der Forschungsergebnisse. Diese Strategie verdeutlicht die Bedeutung der Verbindung einer neuen Oberzelltechnologie mit einer etablierten Unterzellplattform. Dennoch wird nicht die Schlussfolgerung gezogen, dass HJT für jedes Tandemzelle-Konzept zwingend erforderlich oder die universell optimale Lösung ist. Die Auswahl der Unterzelle erfolgt unter Berücksichtigung optischer Verluste, des Temperaturhaushaltes, der Oberflächenstruktur, der Kontaktkompatibilität und der vorhandenen Produktionsinfrastruktur.

Heliatek: Flexible organische Photovoltaik und Anwendungsbereiche

Aussage des Herstellers. Die Produktionsbeschreibung von Heliatek erläutert die kontinuierliche Aufbringung organischer Schichten auf einer Bahn in Vakuum. Dieser Prozess zeigt, dass die organische Photovoltaik nicht nur auf dem Lösungsmittelbeschichtungsverfahren basiert. Die angegebene Kapazität wird von der tatsächlich produzierten Menge getrennt betrachtet. [C14]

Interpretation der Forschung. Bei leichten und flexiblen Produkten sind nicht nur der Wirkungsgrad, sondern auch die Anwendbarkeit auf der Oberfläche, das Gewicht,

die Haftung, die Barriereigenschaften und die Lebensdauer von Bedeutung. Die Tragfähigkeit eines Daches oder die Anforderung an eine gekrümmte Oberfläche können die Technologieauswahl beeinflussen. Die Forschung sollte mit Proben durchgeführt werden, die die Licht- und mechanischen Bedingungen der Zielanwendung simulieren.

Türkei: Kalyon PV

Aussage der Quelle. Kalyons KAP-Mitteilung vom 7. Mai 2026 gibt bekannt, dass die G12R TOPCONPlus-Zellenlinie in Betrieb genommen und die Produktion gestartet wurde; das Unternehmen gibt an, dass die Zellkapazität von 1 GW/Jahr auf 2,1 GW/Jahr erhöht wurde. Dies stellt eine Fortsetzung des vorherigen Investitionsziels dar; es handelt sich nicht um die tatsächlich erreichte jährliche Produktionsmenge.

[C15]

Interpretation der Forschungsergebnisse. Im Rahmen einer lokalen Entwicklungskooperation sollten folgende Fragen beantwortet werden: Welche Forschungsproben kann die neue Zelllinie aufnehmen? Wie wird die Änderung der Rezeptur differenziert? Und wie wird das Pilotprojekt in das Produktionsqualitätssystem integriert? Eine integrierte Produktion kann die Rückverfolgbarkeit von Rohstoffen und Zwischenprodukten erleichtern; es wird jedoch nicht davon ausgegangen, dass ein bestimmter Forschungsdienst verfügbar ist.

Türkei: Smart Güneş Teknolojileri

Aussage der Quelle. Die Mitteilung von Smart vom 10. März 2026 auf der Veröffentlichungsplattform KAP berichtet über die Umsetzung der inländischen Zellproduktion und den Einsatz der mit diesen Zellen im integrierten Werk in Aliğa hergestellten Module im Kraftwerk Niğde Bor. Dieses Dokument hat einen anderen Geltungsumfang als ein älterer Bericht, der lediglich die TOPCon-Kompatibilität der Modullinie feststellte. [C16]

Interpretation der Forschung. Die Zellproduktion und die Modulproduktion haben unterschiedliche Kapazitäts- und Qualitätskriterien. Aus der Formulierung „lokales Produkt“ lässt sich nicht schließen, dass der Absorber, das Wafer oder die gesamte Maschinenpark aus derselben Quelle stammen. Für den Zweck der Forschung müssen vor der Definition der Lieferkettenherkunft der technische Probenfluss, die Messkompetenz und die Änderungskontrolle klar definiert werden.

Türkei: CW Enerji

Aussage der Quelle: Die am 12. August 2026 veröffentlichte Mitteilung von CW Enerji an die Kapitalmärkte (KAP) beschreibt die Inbetriebnahme der ersten 1,2-GW-Zellenfertigungsanlage im Juni 2025 und die Entscheidung, die Kapazität im April 2026 auf 2,5 GW zu erhöhen. Diese Entscheidung bedeutet nicht, dass die Kapazitätserhöhung vollständig abgeschlossen ist. Die Annahme, dass diese Mitteilung einem anderen türkischen Hersteller zuzuordnen ist, wäre eine falsche Zuordnung. [C17]

Interpretation der Forschung. Bei der Untersuchung der vertikalen Integration werden die Kristallzüchtung und das Schneiden des gekauften Ingots getrennt betrachtet. Die lokale Produktion von Zellen, Modulen, Rahmen und anderen Materialien stellt verschiedene technische Arbeitspakete dar. Das Anlegen einer separaten Zeile für jeden Schritt in der Vergleichstabelle des Unternehmens verhindert eine falsche Interpretation des Begriffs „integriert“.

Von der Unternehmensbeschreibung zur Forschungsdokumentation

Wenn man mit der Arbeit an einem Unternehmen beginnt, werden das Produktdatenblatt, die datierte technische Mitteilung, der Tätigkeitsbericht und gegebenenfalls der unabhängige Testbericht zusammengetragen. Zwischen den Dokumenten werden die Produktversion und die Flächenangabe abgeglichen. Aus einer Rekordzelle lässt sich keine Garantie für ein kommerzielles Modul ableiten; aus der erworbenen Ausrüstung darf keine abgeschlossene Produktion abgeleitet werden. Nicht öffentlich zugängliche Prozessrezepte dürfen nicht einmal als Schätzung so formuliert werden, als wären sie real.

Aufgabe: Wählen Sie die Module zweier Unternehmen aus, die die gleiche Leistung haben. Stellen Sie die Zelltechnologie, die Modulfläche, den Temperaturkoeffizienten, die Verbindung, die bifaziale Eigenschaft und die Testbedingungen in derselben Tabelle dar. Lassen Sie fehlende Informationen leer. Schreiben Sie anschließend auf, welche drei unabhängigen Daten benötigt werden, um die Entwicklungsansprüche eines der Unternehmen zu überprüfen. Ziel ist es nicht, einen Gewinner zu ermitteln, sondern festzustellen, unter welchen Bedingungen der Vergleich sinnvoll ist.

Forschungsinfrastruktur, Ausrüstung und Kooperationsmodelle

Was genau liefert eine Forschungsdienstleistung?

Allein die Tatsache, dass eine Einrichtung in ihrer Geräteübersicht ein XRD-Gerät oder ein Beschichtungssystem aufweist, bedeutet nicht, dass die für Ihre Probe erforderliche Methode verfügbar ist. **Kompetenz** umfasst die Kombination aus Gerät, geeignetem Verfahren, geschultem Personal, Kalibrierung und Dateninterpretation. **Die Art der Dienstleistung** - sind es nur Grafiken, Rohdaten, ein Unsicherheitsbericht oder eine reproduzierbare Rezeptur? Die klare Definition der erwarteten Ergebnisse von Anfang an trägt dazu bei, den technischen Umfang der Zusammenarbeit zu präzisieren.

Eine **Spezifikation** ist ein Dokument, das die gewünschten Funktionen und Akzeptanzkriterien beschreibt. Ein **Abnahmetest** prüft, ob die gelieferte Ausrüstung oder Dienstleistung diese Kriterien erfüllt. **FAT** steht für Werksabnahme; **SAT** steht für Abnahme vor Ort. Allein die Tatsache, dass ein Gerät beim Hersteller funktioniert, bedeutet nicht, dass es unter den Gas-, Elektro-, Umwelt- und Integrationsbedingungen in Ihrer Anlage das gleiche Ergebnis liefert. Die Tests müssen an den tatsächlichen Anwendungsbedarf angepasst werden.

Ein Messgerät anhand der Kriterien für seine Ergebnisse beschreiben

Anstelle von „guter Beschichtungsanlage“ können die Filmoberfläche, die Materialfamilie, der Dickenbereich, die Homogenitätsmessung, die Prozessgeschwindigkeit und die Substratbedingungen definiert werden. **Homogenität** beschreibt, wie stark eine bestimmte Größe über die Oberfläche variiert. Wenn die durchschnittliche Dicke innerhalb der Zielwerte liegt, kann dies große Abweichungen an den Rändern verbergen. In der Spezifikation sollte klar definiert sein, welche Punkte gemessen werden und mit welcher Formel die Abweichung angegeben wird.

Synthetisches Beispiel: Das Ziel ist ein 100-nm-Film. An fünf Punkten werden die folgenden Werte gemessen: 90, 95, 100, 105 und 110 nm. Der Durchschnitt beträgt genau 100 nm; die Spannweite beträgt 20 nm. Die Aussage „Die Dicke entspricht dem Ziel“ ist nur in Bezug auf den Durchschnitt korrekt. Wenn das Produkt an jedem Punkt 98-102 nm erfordern würde, wäre dieser Film nicht akzeptabel. Die gleichen Zahlen führen bei unterschiedlichen Akzeptanzdefinitionen zu unterschiedlichen Ergebnissen.

Das **Musterpaket** beinhaltet Informationen zur Identifizierung, Struktur, Größe, erwarteten Signalstärke sowie zur Lagerungs- und Verarbeitungshistorie und dient der Beantwortung von Messfragen. Unbekannte Inhaltsstoffe oder eine unzureichende Vorbereitung beeinträchtigen sowohl die Gerätekompatibilität als auch das Ergebnis. Der **Umfang der Zusammenarbeit** legt fest, welche Partei welche Aufgabe und welche Daten bereitstellt. Vertragsdetails wie Vertraulichkeit und geistiges Eigentum sind projektspezifisch; hier wird erläutert, wie das technische Arbeitspaket definiert wird.

Verständniskontrolle: Haben Sie die Messung erworben und die dazugehörige Erklärung erhalten?

Das Rohsignal, das verarbeitete Ergebnis, das verwendete Modell und die Unsicherheit können separat bereitgestellt werden. Bevor Sie eine Zusammenarbeit beginnen, notieren Sie, was Sie benötigen. Wenn eine Behauptung über einen Mechanismus erforderlich ist, bestimmen Sie auch, ob eine einzelne Messung ausreicht, um dies zu belegen; verwenden Sie den Gerätenamen nicht wie eine Ergebnisgarantie.

Ein PV-Programm muss nicht alle Werkzeuge in sich vereinen. Die richtige Infrastruktur ist die, die es ermöglicht, die Forschungsfrage zeitnah und zuverlässig zu untersuchen. Ein sehr teures Charakterisierungsgerät beantwortet die Frage nicht, wenn die Probe falsch vorbereitet wurde. Im Gegenzug kann eine gut gewählte externe Messung eine monatelange, fehlerhafte Optimierung verhindern. Dieses Kapitel lehrt die Leser, die Institutionen nicht nur als eine Liste von Namen, sondern auch als ihre Funktionen in der Entwicklungskette zu betrachten.

Fragen Sie nach seinen Fähigkeiten, nicht nach dem Namen der Institution

Dass ein Labor hocheffiziente Zellen herstellt, bedeutet nicht, dass es jedem externen Kunden den gleichen Service bietet. Forschungsk Kooperationen, kostenpflichtige Messungen, Technologielizenzen und der Zugang zu Geräten sind separate Modelle. Bevor ein Projekt beginnt, sollten die Art der zu messenden Probe, die Fläche, die erwartete Genauigkeit, die zu liefernden Rohdaten und der Umfang des Berichts festgelegt werden. Eine öffentlich zugängliche Präsentationsseite ist ein Zeichen für Kompetenz; die aktuellen Akzeptanzbedingungen für einen bestimmten Service werden separat überprüft.

Die PV-TEC-Infrastruktur des Fraunhofer ISE dient dazu, Laborergebnisse der Produktion näherzubringen; die CallLab- und TestLab-Familie übernimmt dabei separate Rollen in Bezug auf Mess- und Testaktivitäten. Diese Rollen sollten nicht unter einer einzigen Überschrift „Zertifizierungslabor“ zusammengefasst werden. [D42] Die Perowskit-Tandemgruppe des HZB und die PVcomB-Aktivitäten sind Beispiele für

Forschungsarbeiten, die die Material- und Bauelemententwicklung mit Fragen der Skalierung und Charakterisierung verbinden. [D43]

Die Solarforschung von CSEM befasst sich mit den Herausforderungen beim Übergang von der Bauelementidee zur industriellen Anwendung; die gemeinsamen historischen Tandemarbeiten mit der EPFL sind Beispiele für diese Verbindung. [D44] Die Dünnschichtforschung von Imec/EnergyVille und Solliance ist in Bezug auf Beschichtung und Modulintegration relevant. Es sollte nicht davon ausgegangen werden, dass ein in einer alten Roadmap festgelegter zukünftiger Zeitpunkt heute Realität ist. [D45]

Das National Laboratory of the Rockies, das in früheren Veröffentlichungen unter dem Namen NREL bekannt war, betreibt Forschung im Bereich PV-Materialien und -Bauelementen, wobei sowohl die Leistung als auch die Zuverlässigkeit berücksichtigt werden. In der Bibliografie wird der historische Name der Institution aus dem älteren Artikel beibehalten. [D46] Das Dünnschicht- und Photovoltaiklabor von Empa untersucht verschiedene Absorbermaterialien und flexible Substratansätze. [D47] Die Schulungsmaterialien von UNSW zur PV-Fertigung sind nützlich, um die Siliziumherstellungsprozesse zu erlernen; eine einzelne Schulungsseite ist jedoch keine aktuelle und vollständige Kopie des kommerziellen Herstellungsprozesses. [D06] [D08]

Die Ausrüstung anhand des Prozessoutputs beschreiben

Die Beschaffungs- oder Leistungsspezifikation sollte nicht mit dem Markennamen des Geräts beginnen. Das gewünschte Ergebnis wird angegeben: welches Substrat, welche Fläche, welche Schicht, welche Homogenität, welche Prozesstemperatur, welche Reproduzierbarkeit? Anschließend wird gefragt, unter welchen Bedingungen die Ausrüstung dieses Ergebnis erzielt. Die in einer Vakuumkammer ermittelten optimalen Spezifikationen können sich von dem Verhalten einer realen Probe und bei voller Produktionslast unterscheiden.

Gerätefamilie	Beispielanbieter und Quelle	Schwerpunkt der Abnahmeprüfung
PVD und Vakuumdeposition	VON ARDENNE [D49]	Optische/elektrische Qualität und Homogenität auf einem realen Substrat.
Diffusion, PECVD, Wärmebehandlung.	centrotherm [D50]	Verteilung des Prozesses bei Volllast und das resultierende Verhalten der Zelle.
Nasschemische Oberflächenbehandlung	RENA [D51]	Textur, Sauberkeit, Chemikalienverbrauch und Chargenstabilität
Laser-Mikrobearbeitung	InnoLas Solutions [D52]	Zielschichtselektivität, Beschädigung und elektrische Isolierung.

Diese Beispiele stellen keine Rangliste der Anbieter dar. Die PV-Beschichtungslösungen von VON ARDENNE, die thermischen und Beschichtungsanlagen von centrotherm, die Nassverfahrenssysteme von RENA und die Laserlösungen von InnoLas erfüllen unterschiedliche Funktionen. Eine allgemeine Technologiebroschüre eines Anbieters zeigt nicht, dass eine bestimmte Rezeptur zusammen mit einer Lizenz angeboten wird oder dass eine bestimmte Zielleistung garantiert wird.

Werksabnahme und Abnahme vor Ort

Bei der Geräteabnahme ist es nicht ausreichend, lediglich die mechanische Bewegung oder die Nenndrehzahl zu überprüfen. Es müssen repräsentative Proben mit einer Beschichtung oder Bearbeitung versehen und vorab festgelegte Kriterien durch unabhängige Messungen überprüft werden. Die Abnahme beim Gerätehersteller und die Abnahme beim Anwender erfolgen unter unterschiedlichen Bedingungen. Faktoren wie Gas, Wasser, Elektrizität, Abgas, Vibrationen und Umgebungsunterschiede können einen Einfluss haben.

Die akzeptierten Proben werden nicht nur aus dem idealen Bereich der Ausrüstung ausgewählt. Es werden Messungen an verschiedenen Positionen und über mehrere Zyklen durchgeführt, wobei der Anfangspunkt, die Mitte und das Ende der Ladungsträger berücksichtigt werden. Der Ausgangszustand nach Wartung oder Reinigung wird von den stabilen Produktionsbedingungen unterschieden. Auch wenn die Dicke homogen ist, kann die Verteilung der Zelleistung schlecht sein; eine Validierung bis zur elektrischen Leistung ist erforderlich. Es muss klar angegeben werden, welche Kriterien für das Gerät, welche für das Rezept und welche für die Benutzerprobe gelten.

Musterpaket für Messdienste

In der technischen Dokumentation, die an das externe Labor gesendet wird, sind die Probenidentifikation, die Architektur, die messbare Fläche, die Kontaktanordnung, der erwartete Strom/Spannung, die spezifischen Umgebungsbedingungen und die gewünschten Messungen aufgeführt. Es wird angegeben, welche Oberfläche der Probe geschützt werden muss und unter welchen Bedingungen sie transportiert werden soll. Die Zeit, die eine Perowskit-Zelle im Dunkeln verbringt, oder die Vorspannung, unter der eine Tandemzelle gemessen wird, können das Ergebnis beeinflussen. Diese Informationen werden nicht einfach unter der Bezeichnung „normale Solarzelle“ zusammengefasst.

Die geforderte Lieferung muss ebenfalls konkret sein: Rohdaten der J-V-Kurve, stabile Leistungsserie, Temperatur- und Strahlungsaufzeichnung, Flächendefinition, Kalibrierungskette, Unsicherheit und Vorkonditionierung vor der Messung. Allein der

letzte Wirkungsgradwert ist nicht ausreichend für eine aussagekräftige Diagnose. Die Messung desselben Samples vor und nach dem Transport zum Labor hilft bei der Bewertung von Transport- oder Zeiteffekten.

Informationen und Umfang der Zusammenarbeit

Ein Messdienst unterscheidet sich von einem Dienst zur Entwicklung neuer Prozesse. In einer gemeinsamen Forschungsarbeit werden die Ziele, die Arbeitspakete, die zu verwendenden Proben und die Liefergegenstände festgelegt. Es wird zwischen bereits vorhandenem Wissen und neuem Wissen, das während der Arbeit entsteht, unterschieden. Regelungen zu Vertraulichkeit und geistigem Eigentum werden auf der Grundlage der konkreten Beiträge der beteiligten Parteien erstellt; dieses Buch ist keine Vorlage für einen rechtlichen Vertrag.

Der technische Umfang sollte nicht als Erfolgsgarantie formuliert werden. „Eine bestimmte Anzahl kontrollierter Proben herzustellen und die folgenden Messungen zu liefern“ ist ein nachvollziehbarer Arbeitsauftrag. „Eine Weltrekord-Zelle zu entwickeln“ ist alleinstehend kein Arbeitsplan. Es wird auch erwartet, dass negative Ergebnisse, fehlerhafte Proben und Bedingungen, die außerhalb des Prozesses liegen, dokumentiert werden. Auf diese Weise wird die Forschungsleistung nicht nur in die Lieferung positiver Ergebnisse umgewandelt.

Prioritäten bei der Infrastrukturplanung

Anfangs haben die Nachverfolgbarkeit der Probe, zuverlässige elektrische Messungen und einfache optische Kontrollen eine hohe Bedeutung. Anschließend werden, je nach vorherrschender Unsicherheit der Untersuchung, Lebensdauer, Oberflächenanalyse, Mikroskopie oder fortgeschrittene Spektroskopie hinzugefügt. Für jedes Gerät werden die erwartete Nutzungsfrequenz, die Kompetenz des Bedieners, die Kalibrierung, die Wartung und der Bedarf an der Probenvorbereitung berücksichtigt. Bei geringer Nutzung kann die Auslagerung effizienter sein; tägliche Messungen, die schnelles Feedback erfordern, können intern durchgeführt werden.

Übungsaufgabe. Für ein HJT-Kontaktprojekt stehen Ihnen lediglich ein Solarsimulator und ein optisches Mikroskop zur Verfügung. Welche Messung führen Sie intern durch, welche lassen Sie in einem externen Labor durchführen? Begründen Sie Ihre Antwort nicht mit dem Ansehen der Geräte, sondern mit der zu testenden Hypothese und der erwarteten Bearbeitungszeit. Erstellen Sie für die erste externe Messung eine einseitige Beschreibung der Probe und der Lieferbedingungen.

Forschungsprogramm: drei Fallstudien, Entscheidungspunkte und Arbeitsblätter

Das Ergebnis eines Forschungsprogramms sollte eine Entscheidung sein

In diesem letzten Abschnitt werden die vorherigen Methoden auf drei Fallstudien angewendet. Eine **Fallstudie** ist ein Beispiel, das auf einem bestimmten

Ausgangsdatensatz und einem bestimmten Problem basiert. Eine

Entscheidungsschwelle gibt an, welche Beweise erforderlich sind, um zum nächsten Schritt überzugehen. Wenn die Optionen **Fortsetzen**, **Ändern** und **Stoppen** von Anfang an definiert werden, ist es schwieriger, die Kriterien nach der Betrachtung der Ergebnisse zu ändern. Ziel ist es nicht, jedes Experiment mit einem positiven Ergebnis abzuschließen, sondern herauszufinden, warum ein bestimmter Ansatz funktioniert oder nicht.

Zuerst wird eine **Ausgangsbasis** festgelegt: Welche Verteilung ergab der aktuelle Prozess in wie vielen unabhängigen Produktionsläufen? Dann wird die **Intervention**, also der zu ändernde Prozess, bestimmt. Anschließend wird eine **differenzierende Messung** ausgewählt, um zu beobachten, wie sich die konkurrierenden Faktoren unterschiedlich verhalten. Abschließend wird das **Akzeptanzkriterium** unter Berücksichtigung der Unsicherheit des Gewinns und der Produktionskosten bewertet. Diese Reihenfolge wandelt die reine Verfolgung der besten Zelle in eine umfassende Prozessentwicklung um.

Welche Denkgewohnheit trainieren die drei Fälle?

Im Fall von TOPCon kann es vorkommen, dass die Spannung steigt, die Leistung jedoch nicht; wir unterscheiden zwischen Kontakt- und Transportverlusten. Bei großen Flächen von Perowskit-Zellen ist es möglich, dass der Erfolg kleiner Zellen nicht auf größere Flächen übertragbar ist; wir untersuchen Homogenität, Streifenbildung und die Verbindung. Bei einem neu berechneten Absorber kann ein Kandidat trotz guter elektronischer Eigenschaften an Kriterien zur Phasenstabilität oder zu Defekten scheitern; wir unterscheiden zwischen dem Berechnungsergebnis und einem experimentellen Bauelement. Alle drei Fälle befassen sich nicht mit demselben physikalischen Problem, sondern wenden dieselbe Methode der Beweisführung an.

Synthetisches Entscheidungsbeispiel: Nehmen wir an, die neue Methode hat die durchschnittliche Leistung um 1 % erhöht, aber die Akzeptanzrate von 95 % auf 85 % gesenkt. Die Methode kann pro Produkt anhand des Ziels abgelehnt oder nur in einer bestimmten Unteranwendung untersucht werden. Der Akzeptanzverlust darf nicht mit

dem Hinweis auf ein positives Wirkungsgradergebnis kaschiert werden. Wenn die Kontroll- und die neue Methode an unterschiedlichen Tagen produziert wurden, wird zunächst neu bewertet, ob dieser Vergleich ausreichend ist.

Protokollierung vor dem Experiment: Hierbei werden Hypothesen und Analysen formuliert, bevor die Daten vorliegen. **Prozessbegleitkarte:** Sie dokumentiert die einzelnen Verarbeitungsschritte, die eine Probe durchläuft. **Ergebniskarte:** Sie dient dazu, die beobachteten Daten von den daraus gezogenen Schlussfolgerungen und Einschränkungen zu trennen. **Transferkarte:** Sie zeigt, welche Bedingungen der aus der Literatur entnommenen Methode auf das eigene System übertragen werden können. Die folgenden Formulare sollten nicht als leere Dokumente, sondern als Aufzeichnung der Denkweise im jeweiligen Fall verwendet werden.

Verständniskontrolle: Wie erkennst du, dass das Programm beendet ist?

„Es gibt keine weiteren Experimente, die durchgeführt werden können“ ist oft kein realistisches Kriterium. Ausreichende Beweise, die die ursprüngliche Frage beantworten, eine unabhängige Kontrolle, die zeigt, dass das Ziel erreicht wurde, oder ein eindeutiges negatives Ergebnis, das den Weg versperrt, können als Kriterien für die Vollendung dienen. Im abschließenden Bericht sollten die beantwortete Frage und die noch offene Frage getrennt aufgeführt werden; nur die letztere wird in das nächste Programm übernommen.

Dieses abschließende Kapitel verknüpft die Methoden mit einem praktikablen Forschungsablauf. Die folgenden Fallstudien sind lehrreich und synthetisch; es handelt sich nicht um durchgeführte Experimente oder validierte neue Produkte. Ziel ist es, zu verstehen, welche Beobachtung welchen nachfolgenden Schritt erfordert. Die Zeiträume hängen von der Ausrüstung, dem Zugang zu Proben und der Laborausstattung ab; Entscheidungszeitpunkte liegen vor dem Zeitplan.

Entscheidungspunkt 0: Arbeiten wir an der richtigen Frage?

Das Programm beginnt mit einem Produkt und einer physikalischen Einschränkung. Ein mögliches Ziel könnte darin bestehen, die volle Modulleistung einer bestehenden Siliziumzelle über die Messunsicherheit hinaus zu steigern. Die Aussage „Steigern Sie den Wirkungsgrad“ allein ist nicht ausreichend. Die Ausgangsrezeptur wird mit Angaben zu Fläche, Testbedingungen, Akzeptanzverteilung und erwarteter Effektgröße versehen. Es wird festgelegt, mit welchen Ressourcen gearbeitet werden kann und welche Prozesse von externen Anbietern bezogen werden.

Das Ergebnis dieser Phase ist eine kurze Zielkarte. Bekannte Werte, Annahmen und fehlende Messungen werden separat aufgeführt. Wenn die Zuverlässigkeit der Ausgangsdaten nicht gegeben ist, wird nicht direkt mit der Synthese neuer Materialien begonnen; stattdessen wird zunächst eine Referenz- und Messinfrastruktur aufgebaut.

Der Erfolg der ersten Phase liegt nicht in einem hohen Wirkungsgrad, sondern darin, dass das Problem und der Ausgangszustand messbar sind.

Entscheidungspunkt 1: Lässt sich die Referenz reproduzieren?

Die Referenz wird mindestens in mehreren unabhängigen Produktionschargen angewendet. Mehrere Zellen auf demselben Substrat zeigen die Variation innerhalb einer Charge; sie ersetzen keine unabhängige Produktionswiederholung. Eine Geräte-Kontrollprobe ist an jedem Messtag vorhanden. Rohdaten, nicht akzeptierte Proben und die Gründe für die Ablehnung werden gespeichert. Ohne Kenntnis des Mittelwerts und der Verteilung der Referenz ist es schwierig, geringe Abweichungen zu interpretieren.

Wenn die Messwiederholbarkeit ausreichend ist, die Produktionsstreuung jedoch groß, werden die Prozessquellen untersucht. Wenn die Produktion gut ist, die Geräte jedoch große Unterschiede aufweisen, werden die Kalibrierung und die Flächendefinition überprüft. Beide Probleme erfordern unterschiedliche Lösungen. Sobald die Referenz stabil ist, wird das Änderungsexperiment durchgeführt; wenn sich die Referenz später ändert, wird eine neue Version erstellt.

Fall A: Bei TOPCon-Zellen steigt die Spannung, aber die Leistung nicht

Synthetischer Ausgangspunkt. Bei der Referenzzelle betragen der Kurzschlussstrom $40,0 \text{ mA/cm}^2$, die Leerlaufspannung $0,720 \text{ V}$ und der Füllfaktor $0,820$. Die neue Passivierungsbedingung erhöht die Spannung auf $0,730 \text{ V}$ und senkt den Füllfaktor auf $0,805$; der Strom bleibt unverändert. Bei einer Eingangsleistung von 100 mW/cm^2 betragen die Wirkungsgrade $23,616 \%$ bzw. $23,506 \%$. Die höhere Spannung allein hat nicht zu einer höheren Leistung geführt.

Die erste Erklärung besagt, dass sich die Passivierung verbessert, während der Kontaktwiderstand zunimmt. Die zweite Erklärung besagt, dass der Vor-Kontakt-Gewinn während der Metallisierung verloren geht oder ein neuer Leckstrom entsteht. Die dritte Erklärung besagt, dass die beobachtete Spannungsdifferenz innerhalb der Produktionsstreuung liegt. Keine dieser Erklärungen erfordert zusätzliche Daten.

Vergleichendes Experiment. Die Referenz- und die neue Grenzfläche werden in derselben Charge hergestellt und mit zwei verschiedenen Metallisierungsprozessen verglichen. Die Lebensdauer vor dem Kontakt oder die implizite Spannung, TLM, das J-V-Verhalten im Dunkeln und die stabile Leistung werden gemessen. Die Wiederholung des Gewinns der neuen Grenzfläche vor dem Kontakt und die Verbesserung des Füllfaktors (FF) durch eine geeignetere Metallisierung würden die Hypothese der Prozessinkonsistenz unterstützen. Wenn der Gewinn in einer

unabhängigen Charge nicht vorhanden ist, muss zunächst die Wiederholpräzision untersucht werden.

Entscheidungskriterium. Die neue Bedingung muss nicht nur bei einer einzelnen Zelle, sondern auch bei einer zuvor ausgewählten Stichprobe eine deutliche Leistungssteigerung zeigen; die Ergebnisse der Kontakt- und Alterungstests müssen innerhalb der akzeptablen Grenzen liegen. Die Schwellenwerte werden anhand der vor der Prüfung festgelegten Produktanforderungen ausgewählt. Für diesen Fall wird kein universeller Schwellenwert in mV oder Prozent festgelegt.

Fall B: Kleine Perowskit-Zellen funktionieren gut, große Flächen jedoch schlecht

Synthetischer Anfang. 0,1 cm²-Zellen weisen eine hohe und schmale Leistungsverteilung auf; 25 cm²-Mini-Module weisen eine niedrigere und breitere Verteilung auf. Es ist noch zu früh, den gesamten Leistungsabfall auf „Perowskit-Instabilität“ zurückzuführen. Ungleichmäßigkeit der Beschichtung, kritische Defekte, der P1-P2-P3-Bereich, der laterale Widerstand und Schäden an der Verkapselung sind separate mögliche Ursachen.

Vorläufige Untersuchung. Kleine Zellen werden an verschiedenen Positionen der großen Beschichtung hergestellt. Wenn sich auch die kleinen Zellen auf derselben Schicht verschlechtern, liegt wahrscheinlich ein Problem mit der Beschichtung oder der Schicht vor. Wenn die kleinen Zellen gut sind, das monolithische Modul jedoch schlecht, sind Verbindungsverluste und Flächenverluste wahrscheinlichere Ursachen. Diese Unterscheidung beeinflusst direkt das nächste Experiment.

Vergleichende Versuche. Die Beschichtungsrichtung wird mit der PL-Messung, der Dicke und der Karte der optischen Defekte in Bezug auf die Rand- und Mittelpositionen abgeglichen. An einzelnen Testproben werden Kratzerisolation und Kontaktwiderstand gemessen. Die aktive Fläche und der Wirkungsgrad der offenen Fläche des Moduls werden zusammen angegeben. Die Leistung vor und nach der Verpackung wird an möglichst denselben Proben gemessen. In jedem Schritt wird die Licht- und Temperaturhistorie der Probe dokumentiert.

Entscheidungspunkt. Bevor die Beschichtungsmethode geändert wird, wird die Hauptverlustquelle lokalisiert. Wenn das Problem Kratzerrückstände sind, hat die Untersuchung einer neuen Absorberzusammensetzung einen geringen Informationswert. Wenn das Problem ein Unterschied in der Trocknung entlang der Linie ist, reicht es nicht aus, nur den Zellkontakt zu ändern. Ein großes Flächenziel bleibt ein separates Erfolgsmaß, zusätzlich zum Rekord für kleine Zellen.

Fall C: neu berechneter Absorber-Kandidat

Synthetischer Ausgangspunkt. Die Berechnung prognostiziert eine geeignete Bandlücke und eine hohe ideale optische Leistung. Die Phasenstabilität wurde in einem begrenzten Bereich potenzieller Materialien untersucht; die Defektfangung und die tatsächlichen Kontakte sind noch unbekannt. Dies könnte ein vielversprechender Kandidat für weitere Forschung sein; es handelt sich nicht um ein gemessenes PV-Bauelement.

Kostengünstigste Abfolge zur Unterscheidung. Prüfen Sie zuerst die Rechenkonvergenz und die Abdeckung konkurrierender Phasen. Anschließend untersucht eine Synthese- oder Wachstumsstudie im kleinen Maßstab, ob die Zielphase vorliegt. Bildet sie sich, werden optische Absorption, chemische Stabilität und grundlegendes elektrisches Verhalten gemessen. Danach werden Photoantwort und Ladungssammlung mit einer einfachen Kontaktstruktur beurteilt. Jede Stufe enthält eine Kontrolle, die die Fehlerquelle unterscheidet.

Entscheidungsschleife. Wenn das Ziel nicht erreicht wird oder die erforderliche Prozessbedingung nicht mit dem Substrat kompatibel ist, wird die Route geändert, bevor die vollständige Zelloptimierung durchgeführt wird. Wenn ein Kandidat abgebrochen wird, werden der Grund und die getesteten Bedingungen gespeichert. „Nicht ausprobiert“ und „unter diesen Bedingungen fehlgeschlagen“ sind unterschiedliche Arten von Informationen. Ein negatives Ergebnis vereinfacht die Auswahl des nächsten Kandidaten.

Ein Arbeitsplan, der in Wochen unterteilt werden kann

Der untenstehende Zeitplan stellt keine Garantie dar; es wird nicht zum nächsten Schritt übergegangen, bevor die Ergebnisse des vorherigen Schritts vorliegen. Wenn die Ausrüstung bereit ist, kann die Aufgabe innerhalb weniger Wochen abgeschlossen werden, andernfalls, wenn externe Dienstleistungen oder neue Prozesse erforderlich sind, kann es länger dauern.

Stufe	Arbeit	Konkretes Ergebnis
Beginn	Auswahl von Literatur und Referenzen	Quellenaufzeichnungen, Zielprofil, Verlustbudget
Messung	Kalibrierung und Wiederholung	Unsicherheitsbudget, Referenzkontrollreihe.
Referenz	Unabhängige Chargen	Rezeptversion, Verteilung und fehlerhafte Proben.
Intervention	Kontrollierte faktorielle Studie	Effekte, Wechselwirkungen und Messungen von Mechanismen.
Bestätigung	Neue Charge und unabhängige Messung.	Reproduzierter Gewinn oder ein eindeutiges negatives Ergebnis

Stufe	Arbeit	Konkretes Ergebnis
Übertragung	Fläche und Verpackung	Pilot-Fluss, CTM-Datei und Beständigkeitsdatei.

Formular 1: Vor dem Experiment zu erfassende Daten

Forschungsfrage: Welche physikalischen Verluste sollen reduziert werden? Welches Ergebnis würde diese Hypothese widerlegen?

Referenz: Was ist die Referenzarchitektur, die Rezepturversion, die Rohstoffcharge und das Messprotokoll?

Intervention: Welche Faktoren werden verändert? Welche Faktoren bleiben konstant? Gibt es eine Kontrollgruppe, die keine aktive Substanz enthält, aber denselben Verarbeitungsprozess durchläuft?

Methodik: Was ist die Versuchseinheit? Wie wurden unabhängige Gruppen, Blöcke, die Randomisierung und die Stichprobengröße ausgewählt?

Antwort: Was ist die primäre Ausgabe und der Messzeitpunkt? Wie werden die Werte für stabile Leistung, Fläche und Unsicherheit angegeben?

Entscheidung: Von welcher vordefinierten Bedingung hängt es ab, ob der Prozess fortgesetzt, wiederholt, die Route geändert oder gestoppt wird?

Formular 2: Probenbegleitkarte

Die Proben-Tracking-Karte dokumentiert beispielsweise die Identität und den Verlauf einer Probe während des gesamten Produktionsprozesses. Jede Zeile enthält Informationen zu Zeit, Prozess, Ausrüstung, Rezeptversion, Bediener oder automatischer Erfassung, Eingangskontrolle und Ausgangskontrolle. Bei einer Abweichung wird diese nicht nur im abschließenden Bericht, sondern auch zum Zeitpunkt ihres Auftretens erfasst. Wenn dieselbe Probe erneut bearbeitet wird, werden die vorherigen Schritte nicht gelöscht.

Fläche	Zu speichernde Informationen.
Identität	Programm, Charge, Substrat, Zell-/Modulkennung
Material	Lieferant, Charge, Reinheitszertifikat, Lagerhistorie
Prozess	Aufzeichnung von tatsächlicher Dauer, Temperatur, Fluss und Ausrüstung
Warten.	Umgebung, Licht, Feuchtigkeit und Dauer.
Messung	Rohdatei, Kalibrierung, Fläche, Bedingung
Abweichung	Unerwartetes Ereignis, Ausschlussgrund, Entscheidung.

Formular 3: Ergebnis- und Nachweiskarte

Der erste Satz einer Ergebnisübersicht beschreibt den Umfang: „In dieser Architektur, unter diesen Messbedingungen und mit diesen unabhängigen Parametern wurde die folgende Abweichung beobachtet.“ Darauf folgen Angaben zur Effektstärke, zur Unsicherheit, zur Verteilung und zu den Kontrollergebnissen. Die Interpretation des Mechanismus wird in einem separaten Absatz erläutert. Es wird angegeben, welche alternativen Erklärungen verworfen wurden und welche weiterhin in Betracht gezogen werden. Der letzte Satz beschreibt das nächste Unterscheidungsexperiment.

An die Ergebnisdatei werden die Rohdatendateien, die Analyseversion, die Stichprobenliste und die Quellen angehängt. Es werden keine reinen Bildschirmfotos geliefert. Das Reproduktionspaket muss sicherstellen, dass ein anderer Forscher aus denselben Daten dieselbe Tabelle erstellen kann. Wenn die Daten korrigiert wurden, werden die alte Version und der Grund für die Änderung beibehalten.

Formular 4: Übertragung von Informationen aus der Literatur

Der Titel des Artikels, die DOI oder der permanente Link sowie der Umfang des Zugriffs werden erfasst. Die Bauelementstruktur, die Flächenbeschreibung, die Messbedingungen, der stabile Leistungszustand, die Anzahl der Proben und die Alterungsmethode sind separate Bereiche. Wenn Details zu einer nicht zugänglichen Methode fehlen, werden diese nicht durch Schätzungen ergänzt. Es wird beschrieben, welchen Mechanismus die Studie unterstützt und in welchen Aspekten sich Ihre Probe von anderen unterscheidet.

In einer Unternehmensmitteilung werden dem gleichen Datensatz Informationen über das Produkt oder den Pilotstatus, das Datum der Mitteilung und den Umfang der unabhängigen Validierung hinzugefügt. Die Ressourcen müssen regelmäßig aktualisiert werden; eine aktuelle Rekordtabelle ersetzt jedoch nicht das Erlernen der grundlegenden Physik und der Methoden. Wenn diese beiden Bücher zusammen verwendet werden, liefert das erste Buch die Gründe, und das zweite Buch liefert die messbaren Schritte zur Verbesserung. Der Test des Lernens besteht darin, erklären zu können, warum man in einer neuen Aufgabe ein bestimmtes Experiment ausgewählt hat.

Buch II · Literaturverzeichnis und Zugangshinweise

D-Kennungen bezeichnen Quellen zu Methoden und Infrastruktur, C-Kennungen Unternehmensquellen. Unternehmensangaben sind eine andere Art von Evidenz als eine unabhängige experimentelle Validierung. Ein Katalogzugriff bedeutet nicht, dass der gesamte Text einer Norm geprüft wurde.

[D01] Solar Photovoltaic Manufacturing Basics

U.S. Department of Energy (2021).

<https://www.energy.gov/cmei/systems/solar-photovoltaic-manufacturing-basics>

Die unternehmenseigene Schulungsunterlage zur Produktionskette von Wafern und Dünnschichten wurde hinsichtlich ihres Inhalts geprüft.

[D02] Photovoltaics Report, 14 July 2026

Fraunhofer ISE; PSE Projects (2026).

<https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/photovoltaics-report.html>

Offizielle Veröffentlichungsseite des aktuellen Berichts. Verwendet für den Markt- und Technologiekontext; separate Leistungskategorien werden beibehalten.

[D03] Snapshot of Global PV Markets 2026: Fact Sheet

IEA PVPS (2026).

<https://iea-pvps.org/fact-sheets/fs-snapshot-2026/>

Die Veröffentlichung für 2026 bezüglich des Marktes bis Ende 2025; Kapazität und Auslieferung sind keine gleich großen Größen.

[D04] Status and perspective of industrial TOPCon solar cell development at Fraunhofer ISE

S. Mack und andere. (2022).

https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/conference-paper/wcpec-8/Mack_1AO63.pdf

Es wurde eine sechsstufige Konferenzarbeit analysiert. Sie beschreibt den Prozess einer bestimmten Forschungsrichtung und ist keine allgemeingültige Fabrikationsanleitung.

[D05] ForTeS: Passivated Contacts for High-Efficiency Silicon Solar Cells

Fraunhofer ISE (ohne Datum).

<https://www.ise.fraunhofer.de/en/research-projects/fortes.html>

Dies ist die Projektseite, auf der das Institut seine eigenen TOPCon-Forschungsarbeiten vorstellt. Die historischen Experimente wurden nicht als aktueller Produktionsrekord präsentiert.

[D06] Alkaline texturing

UNSW / PV-Manufacturing.org (ohne Datum).

<https://pv-manufacturing.org/alkaline-texturing/>

Informationsseite zum Thema Kristallorientierung, Textur und Benetzung; frühere Marktanteile wurden nicht verwendet.

[D07] Diffusion basics; tube diffusion

UNSW / PV-Manufacturing.org (ohne Datum).

<https://pv-manufacturing.org/solar-cell-manufacturing/diffusion-basics/>

Grundlegende Erläuterung der Diffusion. Der Fehler in der zweiten Fick-Gesetz-Formel auf der Quellseite wurde nicht übernommen; im Buch wurde die physikalische Diffusionsgleichung mit einem positiven Wert für D verwendet.

[D08] Cz Monocrystalline Silicon Production

UNSW / PV-Manufacturing.org (ohne Datum).

<https://pv-manufacturing.org/silicon-production/cz-monocrystalline-silicon-production/>

Cz und die Dotierung wurden für die Analyse verwendet; die auf der Seite angegebenen historischen Marktanteile wurden nicht als aktuelle Daten berücksichtigt.

[D09] Only 4 Steps! Witness the Birth of a Huasun Heterojunction Solar Cell

Huasun (2024-05-09).

<https://www.huasunsolar.com/news/only-4-steps-witness-the-birth-of-a-huasun-heterojunction-solar-cell.html>

Beschreibung der Hauptprozessgruppen des Herstellers. Die verwendete Marketingterminologie und die angegebenen Wirkungsgrade wurden nicht als unabhängige Bestätigung gewertet.

[D10] Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%

K. Yoshikawa und andere. (2017).

<https://www.nature.com/articles/nenergy201732>

Die Zusammenfassung des Verlags und die Artikeldatenbank wurden geprüft; es handelt sich um ein historisches Beispiel für die Kombination von HJT und IBC.

[D11] Low-loss contacts on textured substrates for inverted perovskite solar cells

S. M. Park und andere. (2023).

<https://www.nature.com/articles/s41586-023-06745-7>

Die Zusammenfassung des Verlags, die Bildunterschriften und der Hinweis zum Datenzugriff wurden geprüft; die vollständige Version des Artikels, die im Rahmen eines Abonnements verfügbar ist, wurde nicht vollständig geprüft.

[D12] Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition

M. Liu; M. B. Johnston; H. J. Snaith (2013).

<https://www.nature.com/articles/nature12509>

Basierend auf der Zusammenfassung des Verlags wurde eine frühe Vakuumabscheidung demonstriert; es wurde keine detaillierte Rezepturanalyse durchgeführt.

[D13] Surfactant-controlled ink drying enables high-speed deposition of perovskite films for efficient photovoltaic modules

Y. Deng und Mitarbeiter (2018).

<https://www.nature.com/articles/s41560-018-0153-9>

Die Zusammenfassung des Verlags wurde geprüft. Die Ergebnisse für kleine Zellen und Module mit unterschiedlicher Öffnungsfläche wurden separat betrachtet.

[D14] Choosing an experimental design

NIST/SEMATECH (ohne Datum).

<https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pri/section3/pri3.htm>

Rahmen für die Auswahl der statistischen Versuchsplanung. Die im Buch enthaltenen PV-Beispiele sind originelle Lehrkonzepte.

[D15] What is Process Capability?

NIST/SEMATECH (ohne Datum).

<https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pmc/section1/pmc16.htm>

Der Prozessstabilität, die Verteilung und die Annahmen für den Leistungsindex wurden verwendet.

[D16] Gauge R&R studies

NIST/SEMATECH (ohne Datum).

<https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/mpc/section4/mpc4.htm>

Der Rahmen für die Wiederholbarkeit der Messungen und die Reproduzierbarkeit ist spezifisch für das in diesem Buch beschriebene PV-Messdesign.

[D17] Consensus statement for stability assessment and reporting for perovskite photovoltaics based on ISOS procedures

M. V. Khenkin und andere. (2020).

<https://www.nature.com/articles/s41560-019-0529-5>

Das offene Konsensdokument wurde zur Unterscheidung von Betriebsbedingungen, dem maximalen Leistungspunkt (MPP) und internen/externen Spannungen verwendet.

[D18] Degradation and Failure Modes in New Photovoltaic Cell and Module Technologies

IEA PVPS Task 13 (2025).

<https://iea-pvps.org/key-topics/degradation-failure-modes-new-cell-module-technologies/>

Offizielle Berichtseite und Zusammenfassung. Die in dem Buch enthaltenen Diagnose-Tabellen stellen keine definitive Diagnose für einzelne Fehler dar.

[D19] IEC 60904-1-1:2017

IEC (2017).

<https://webstore.iec.ch/en/publication/29335>

Der Umfang des offiziellen Katalogs wurde geprüft; nicht alle Anwendungsartikel des kostenpflichtigen Standards wurden kopiert oder als geprüft betrachtet.

[D20] IEC 60904-9:2020

IEC (2020).

<https://webstore.iec.ch/en/publication/28973>

Der offizielle Anwendungsbereich der Simulator-Klassifizierung bedeutet nicht, dass das Klassifizierungszertifikat eine spektrale Fehlerfreiheit für das jeweilige Gerät garantiert.

[D21] IEC 61215-1:2021

IEC (2021).

<https://webstore.iec.ch/en/publication/61345>

Der Umfang der Designvalidierung besagt, dass die in den Katalogen aufgeführten Tests keine quantitative Abschätzung der Lebensdauer ermöglichen.

[D22] IEC 61730-1:2023

IEC (2023).

<https://webstore.iec.ch/en/publication/59803>

Offizielle Spezifikation bezüglich der Sicherheitsanforderungen der Modulstruktur.

[D23] IEC TS 62915:2023

IEC (2023).

<https://webstore.iec.ch/en/publication/66172>

Der Umfang der erneuten Testbewertung im Zusammenhang mit Design- oder Materialänderungen wird in der im Juli 2024 überarbeiteten Katalogversion angegeben.

[D24] Phase Diagrams (PDs)

Materials Project (Abgerufen 2026).

<https://docs.materialsproject.org/methodology/materials-methodology/thermodynamic-stability/phase-diagrams-pds>

Definition und Anwendungsbereich der Phasenübergangsmatrix.

[D25] SCAPS: Solar Cell Capacitance Simulator

Ghent University / Marc Burgelman (Abgerufen 2026).

<https://scaps.elis.ugent.be/>

Die offiziellen Werkzeuge und Algorithmen dienen nicht der experimentellen Validierung der Softwareergebnisse.

[D31] Large Area TOPCon Cells Realized By a PECVD Tube Process

F. Feldmann und andere. (2019).

https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/conference-paper/36-eupvsec-2019/Feldmann_EO14.pdf

Öffentliche Konferenzpräsentation; spezifisches Beispiel für ein Experiment zum Thema Tempern/Hydrierung und Kontaktmessung.

[D32] Silicon heterojunction solar cells with up to 26.81% efficiency achieved by electrically optimized nanocrystalline-silicon hole contact layers

H. Lin und andere. (2023).

<https://www.nature.com/articles/s41560-023-01255-2>

Die Zusammenfassung, die Ergebnisse und die Methodenabschnitte verschiedener wissenschaftlicher Artikel wurden analysiert. Es wurde festgestellt, dass die höchste Fill-Factor- und Wirkungsgradwerte in unterschiedlichen Zellen erzielt wurden.

[D33] The first demonstration of entirely roll-to-roll fabricated perovskite solar cell modules under ambient room conditions

H. C. Weerasinghe und andere. (2024).

<https://www.nature.com/articles/s41467-024-46016-1>

Frei zugängliche Primärforschung; das Modulergebnis von 11 % bei etwa 50 cm² aktiver Fläche wurde nicht mit einem Rekord auf kleiner Fläche gleichgesetzt.

[D34] Fully textured monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with 25.2% power conversion efficiency

Sahli und Mitarbeiter. (2018).

<https://www.nature.com/articles/s41563-018-0115-4>

Die Zusammenfassung des Verlags und die Bildunterschriften wurden eingesehen; der vollständige Text der Methodik, der hinter einer Paywall liegt, wurde nicht berücksichtigt.

[D35] Highly Efficient Perovskite Solar Modules by Scalable Fabrication and Interconnection Optimization

M. Yang und andere. (2018).

<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsenergylett.7b01221>

Zusammenfassung des Verlags und erläuternde Zusatzinformationen; Beispiel für die Unterscheidung zwischen Kontaktwiderstand und Flächenbegriff.

[D36] Doping with phosphorus reduces anion vacancy disorder in CdSeTe semiconductors enabling higher solar cell efficiency

Kuciauskas und Mitarbeiter. (2025).

<https://www.nature.com/articles/s41467-025-63589-7>

Eine frei zugängliche Originalarbeit. Das in der Simulation verwendete Potenzial von 25 % wurde von dem gemessenen Wert von 20,2 % abgeleitet.

[D37] High-concentration silver alloying and steep back-contact gallium grading enabling copper indium gallium selenide solar cell with 23.6% efficiency

Keller und Mitarbeiter. (2024).

<https://www.nature.com/articles/s41560-024-01472-3>

Offen zugängliche Originalarbeit; zertifiziertes 23,64 %, Uppsala-Team. Es wurde kein Anspruch auf einen neuen Rekord erhoben.

[D38] Products and manufacturing technology

AZUR SPACE (Abgerufen 2026).

<https://www.azurspace.com/en/products/>

MOVPE und die III-V-Halbleiterfamilie sind nicht für die Anwendung in der Weltraum-AM0-Kategorie mit der terrestrischen AM1.5G-Kategorie gleichwertig.

[D39] Equally high efficiencies of organic solar cells processed from different solvents reveal key factors for morphology control

Zhang und Mitarbeiter. (2024 online; Zeitschriftenband 2025).

<https://www.nature.com/articles/s41560-024-01678-5>

Beispiel für eine Methode mit offenem Zugang: Molekül-Lösungsmittel-Wechselwirkungen und Morphologie.

[D40] Mixed-quantum-dot solar cells

Yang und Mitarbeiter. (2017).

<https://www.nature.com/articles/s41467-017-01362-1>

Ein Beispiel für eine öffentlich zugängliche historische Methode; es wurde nicht als aktueller Rekordwert präsentiert.

[D41] Orthogonal colloidal quantum dot inks enable efficient multilayer optoelectronic devices

Autoren des Originalartikels (2020).

<https://www.nature.com/articles/s41467-020-18655-7>

Der Suchauszug des Verlags war zugänglich; wegen eines Fehlers beim direkten Öffnen wurden keine detaillierten Methoden oder Rekordleistungswerte übernommen.

[D42] PV-TEC: Photovoltaic Technology Evaluation Center

Fraunhofer ISE (Abgerufen 2026).

<https://www.ise.fraunhofer.de/de/fue-infrastruktur/tecs/pv-tec.html>

Die Definition der unternehmenseigenen Infrastruktur geht nicht davon aus, dass eine bestimmte externe Dienstleistung in Anspruch genommen wird.

[D43] Perovskite Tandem Solar Cells

Helmholtz-Zentrum Berlin (Abgerufen 2026).

https://www.helmholtz-berlin.de/forschung/oe/se/perovskite-tandemsolarcells/index_de.html

Offizielle Definition der Forschungsgruppe.

[D44] Corporate highlights 2025

CSEM (2025).

<https://www.csem.ch/en/annual-report/2025/corporate-2025/>

Im Kontext der Solarforschung und des Technologietransfers in die Industrie wurden die historischen gemeinsamen Projekte D34 betrachtet.

[D45] The tandem module, a unique opportunity to reboot EU PV industry

imec (2020).

<https://www.imec-int.com/en/imec-magazine/imec-magazine-june-2020/the-tandem-module-a-unique-opportunity-to-reboot-eu-pv-industry>

Die historische, institutionelle Methode/der historische Fahrplan wurde als nicht geeignet angesehen, um die zukünftigen Ziele zu erreichen.

[D46] Materials and Devices: Photovoltaic Research

National Laboratory of the Rockies (Abgerufen 2026).

<https://www.nlr.gov/pv/materials-devices>

Auf der aktuellen Website wird der Name NREL beibehalten, während in älteren Publikationen die historische Form des Namens verwendet wird.

[D47] Laboratory for Thin Films and Photovoltaics

Empa (Abgerufen 2026).

<https://www.empa.ch/en/web/s207>

Bereiche der unternehmerischen Forschung.

[D49] Photovoltaics coating systems

VON ARDENNE (Abgerufen 2026).

https://vonardenne.com/fileadmin/user_upload/brochures/VA_Photovoltaics/VONARDENNE_PV_eng.pdf

Es handelt sich um eine Broschüre mit offiziellen Geräteinformationen; sie stellt keine spezifische Leistungs- oder Kaufempfehlung dar.

[D50] Photovoltaics

centrotherm (Abgerufen 2026).

<https://www.centrotherm.de/en/industry-solutions/photovoltaics>

Offizielle Definition der thermischen und Beschichtungsanlagenfamilien.

[D51] Green Energy

RENA (Abgerufen 2026).

<https://www.rena.com/en/products/green-energy>

Nasse chemische Oberflächenbehandlungen; keine Rangfolge der Lieferanten erstellt.

[D52] InnoLas companies and laser applications

InnoLas (Abgerufen 2026).

<https://www.innolas.com/>

Bei den PV-Mikrobearbeitungslösungen von InnoLas Solutions wurde keine präzise Geräteanforderung vorausgesetzt.

[D53] CalLab PV Modules

Fraunhofer ISE (Abgerufen 2026).

<https://www.ise.fraunhofer.de/en/rd-infrastructure/accredited-labs/callab/callab-pv-modules.html>

Die institutionelle Definition des Kalibrierungslabors für Module hängt vom Umfang und der Unsicherheit ab, die von den Probenbedingungen beeinflusst werden.

[C01] Hi-MO X10 module featuring HPBC 2.0 cell technology

LONGi (2024-10-14).

<https://www.longi.com/en/news/longi-hpbc-2-new-product-hi-mo-x10-launch/>

Produktvorstellung: HPBC 2.0, Herstellerangaben zur Leistung. Unternehmensvergleiche wurden nicht als unabhängige Ergebnisse gewertet.

[C02] N-Type ABC Technology

AIKO (ohne Datum).

<https://aikosolar.com/en/techbreakthroughs/>

ABC, Unternehmensbeschreibung für Rückseitenkontakt und metallfreie Metallisierung; die Punkte des Zeitplans sind mit den jeweiligen Jahren versehen.

[C03] Second Quarter 2026 Financial Results

JinkoSolar (2026).

<https://ir.jinkosolar.com/news-releases/news-release-details/jinkosolar-announces-second-quarter-2026-financial-results>

Die für das Ende des Jahres 2026 anvisierte Produktionskapazität für TOPCon 3.0 wurde als eine zukunftsgerichtete Aussage ausgewiesen und nicht als bereits realisierte Produktion berücksichtigt.

[C04] Trinasolar Advances TOPCon 2.0 Era With Global Delivery

Trinasolar (2025).

<https://www.trinasolar.com/us/resources/newsroom/Trinasolar-Advances-TOPCon-2.0-Era-With-Global-Delivery/>

Produkt- und Lieferbeschreibung für Vertex N / TOPCon Ultra; der einzelne Rekordwert wurde nicht mit dem Produktionsmittelwert gleichgesetzt.

[C05] 2024 Annual Report of JA Solar Technology Co., Ltd.

JA Solar (2025).

<https://disc.static.szse.cn/disc/disk03/finalpage/2025-06-27/3270832f-a5b8-4d88-a684-be133b31da39.PDF>

Der in den Archiven der offiziellen Börse verfügbare Tätigkeitsbericht wurde für die Produktlinien Bycium+ und DeepBlue 5.0 verwendet.

[C06] REC Alpha Pure-RX

REC Group (ohne Datum).

<https://www.recgroup.com/en/rec-alpha-pure-rx>

HJT-Wohnmodul und Verbindungsstruktur. Die Garantiebedingungen wurden nicht als gemessene Lebensdauer im Feld angegeben.

[C07] Huasun HJT products and manufacturing

Huasun (Abgerufen 2026).

<https://www.huasunsolar.com/>

Die HJT-Produktfamilie und die Angaben des Herstellers zur Produktionskapazität/zu den Liefermengen wurden anhand von 2026 Seiten analysiert.

[C08] New-generation TNC high-efficiency cell manufacturing technology

Tongwei (2026-06-05).

<https://www.tongwei.com/news/detail/170975.html>

Die auf der Herstellerseite angegebene TNC 3.0-Spezifikation enthält Informationen zur Randpassivierung und zum Strukturierungsprozess; die in der Quelle enthaltenen Werbeaussagen stellen keine unabhängige Validierung dar.

[C09] 2025 Annual Report

First Solar (2026).

https://s202.q4cdn.com/499595574/files/doc_events/2026/May/13/FSLR-2025-Annual-Report-web.pdf

Die Technologie- und Produktionsabschnitte des 143-seitigen Berichts wurden analysiert; der CuRe-Implementierungsplan wurde nicht als abgeschlossene globale Transformation betrachtet.

[C10] Perovskite tandem panels: first commercial shipment

Oxford PV (2024-09-05).

<https://www.oxfordpv.com/press-releases/oxford-pv-solar-technology-patent>

Die erste Ankündigung der kommerziellen Auslieferung des Unternehmens enthielt keine Angaben zum Gesamtproduktionsvolumen oder zu jahrelangen Felddaten.

[C11] Key Tandem Solar Module Stability Milestone

Qcells (2025-05-14).

<https://us.qcells.com/blog/qcells-achieves-key-tandem-solar-module-stability-milestone/>

Beschreibung der Tests für die auf M10 basierenden Pilotlinienmodule; dies stellt weder eine Serienfreigabe noch einen Nachweis der vollständigen Lebensdauer dar.

[C12] GW-Scale Perovskite Industrial Base Commences Production in Kunshan

GCL Technology (2025-06-24).

<https://www.gcltech.com/en/about/newsinfo/973.html>

Die Unternehmensmitteilung zur Inbetriebnahme der Produktionsanlage; die auf dem Typenschild angegebene Kapazität entspricht nicht der tatsächlich erreichten jährlichen Produktionsmenge an einwandfreien Produkten.

[C13] Silicon Today, Tandems Tomorrow

Swift Solar (2026-03-12).

<https://www.swiftsolar.com/news/silicon-today-tandems-tomorrow>

Der Erwerb der Produktionsanlagen und des geistigen Eigentums von Meyer Burger sowie der US-amerikanische Standort und die geplante Erweiterung für Tandemzellen wurden als separate Projekte ausgewiesen.

[C14] Roll-to-Roll Series Production

Heliatek (Abgerufen 2026).

<https://www.heliatek.com/en/technology/roll-to-roll-series-production/>

Kontinuierlicher Produktionsprozess für organische Photovoltaikzellen mittels Vakuumverdampfung. Die angegebene Kapazität entspricht nicht der tatsächlich produzierten Menge.

[C15] Abschluss der Investition in die G12R TOPCONPlus Solarzelle.

Kalyon PV (2026-05-07).

<https://www.kap.org.tr/tr/Bildirim/1602169>

Die Unternehmensmitteilung an die KAP (Kapitalmärkte-Plattform): Die Inbetriebnahme der Produktionslinie und der Produktionsbeginn wurden nicht als Realisierung der jährlichen Kapazität interpretiert.

[C16] Die vollständige Abnahme des Solarkraftwerks Niğde Bor; Verwendung von Modulen mit lokal gefertigten Solarzellen.

Smart Güneş Teknolojileri (2026-03-10).

<https://www.kap.org.tr/en/Bildirim/1569417>

Die Erklärung von Smart Güneş deutet auf die lokale Produktion von Solarzellen und -modulen in Aliğa hin; sie unterscheidet sich jedoch von einem früheren Bericht, der lediglich die Kompatibilität der Module erwähnte.

[C17] Erklärung zu Showroom-Verträgen und Produktionsinfrastruktur in den USA.

CW Enerji (2026-08-12).

<https://www.kap.org.tr/tr/Bildirim/1648411>

Die Unternehmensidentität wurde auf einer Vollseite bestätigt: CW Enerji. Die erste Phase wurde in Betrieb genommen, und die Entscheidung über die Kapazität der zweiten Phase wurde getroffen.