

Brockmann et al., tandemPV Workshop 2024, Amsterdam NL, Oxford PV/ISFH

ZUPER - Zuverlässigkeit und Performance von PV-Modulen, Systemen und Anwendungen

Herausforderungen bei Perovskit/Silizium Tandemsolarmodulen

M. Köntges

Institut für Solar Energieforschung GmbH (ISFH),
Am Ohrberg 1, 31860 Emmerthal, Germany



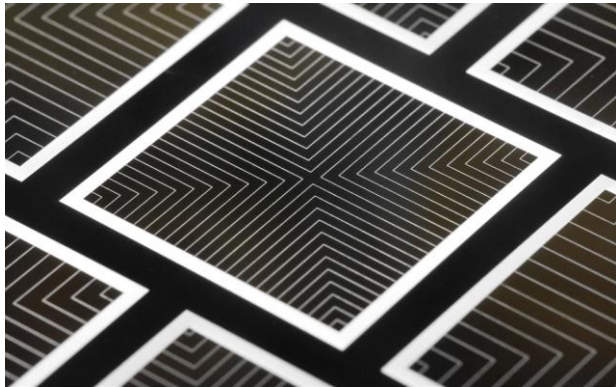
TASK13 Zuverlässigkeit und Performance von Photovoltaiksystemen

ST1: Zuverlässigkeit von neuen PV-Materialien, Komponenten und Modulen

ST2: Leistung und Haltbarkeit von PV Anwendungen

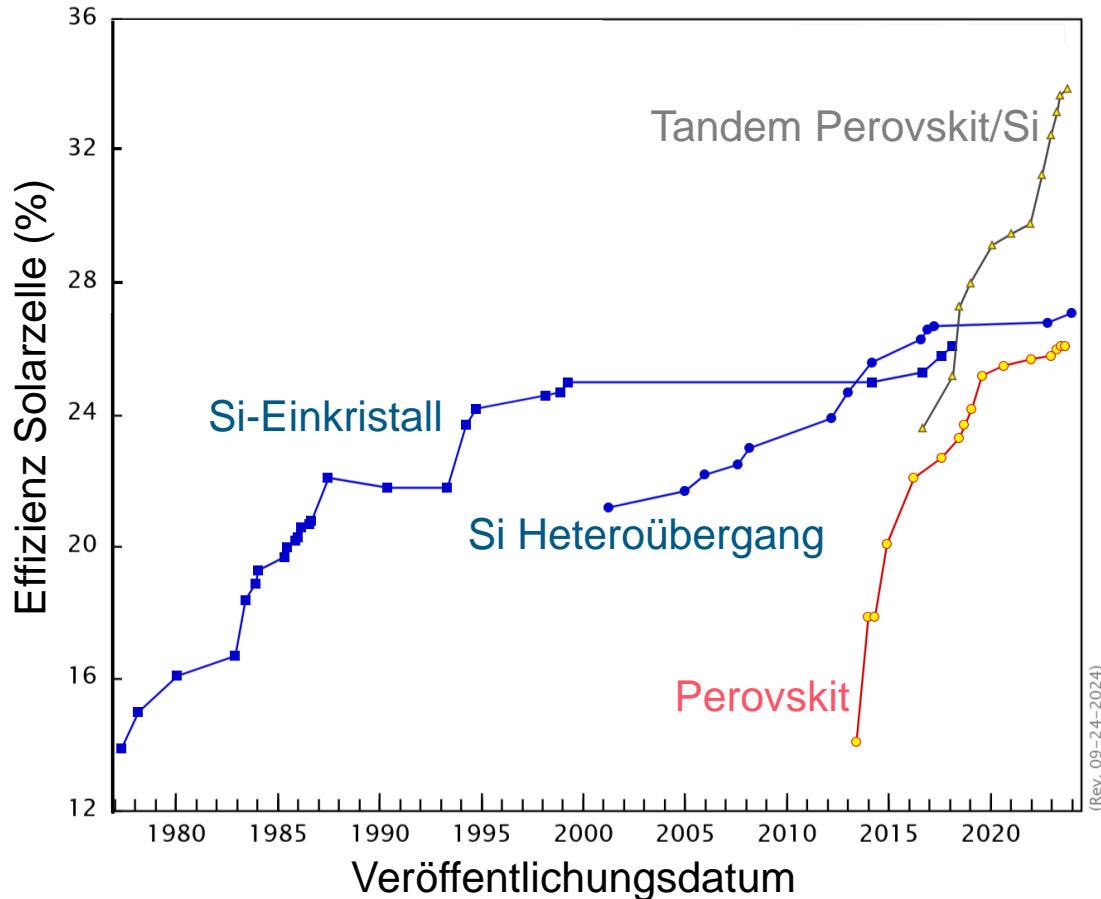
ST3: Techno-Ökonomische Schlüsselindikatoren für den Gewinn

ST4: Verbreitung und Öffentlichkeitsarbeit



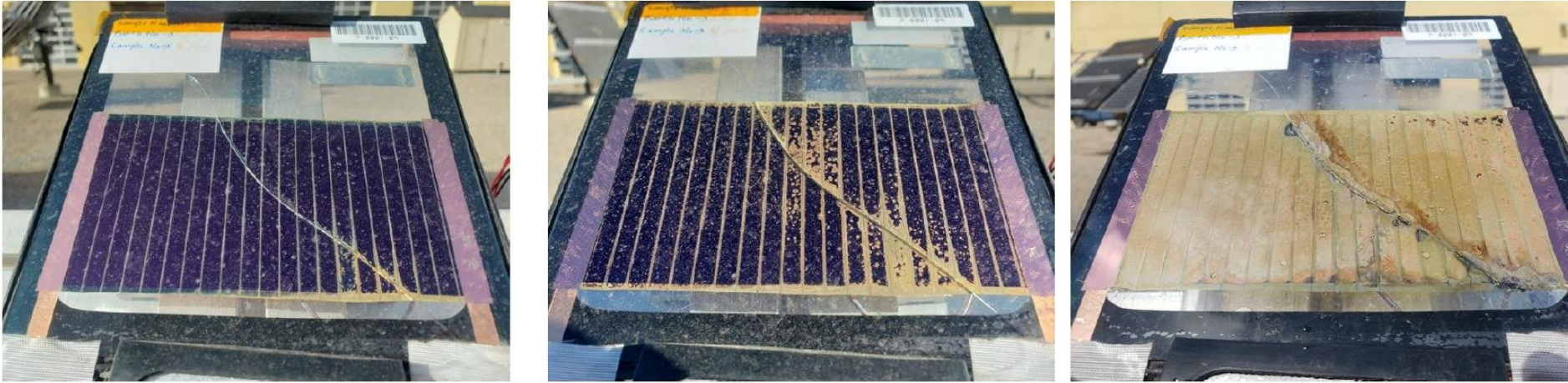
Internationale Zusammenarbeit: 165+ Experten und Beitragende aus 25 Ländern
<https://iea-pvps.org/research-tasks/performance-operation-and-reliability-of-photovoltaic-systems/>

Warum arbeitet man mit Perovskiten für Solarzellen?



Daten von <https://www.nrel.gov/pv/interactive-cell-efficiency.html>

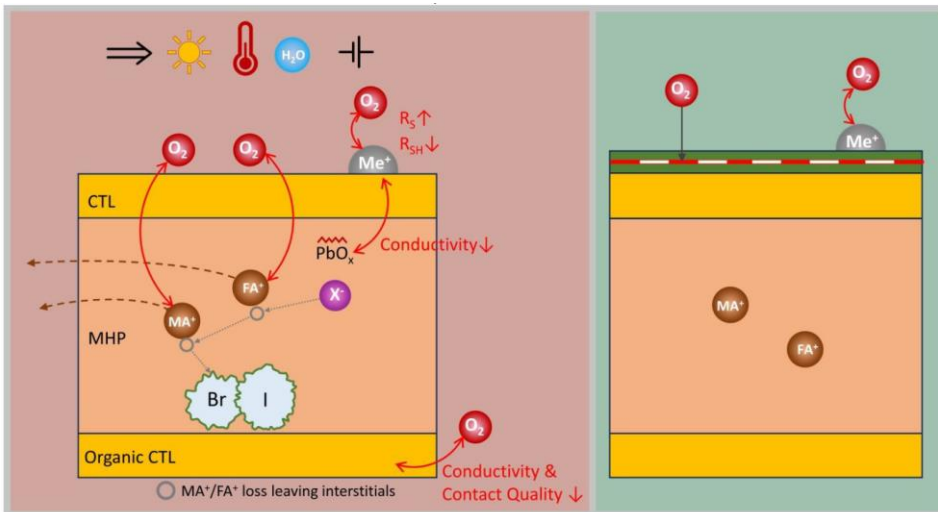
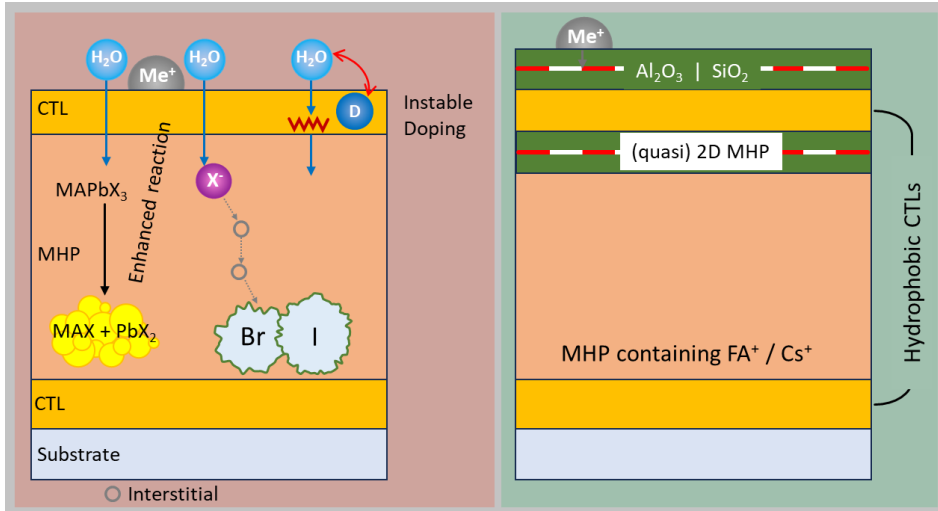
- MHP: hohe Wirkungsgrade erreichbar 2024:26,1%
- Prinzipiell leicht herzustellen
- Bandlücke einstellbar, nötig für effizientere Tandemsolarzellen
- Wirkungsgrade Tandem Perovskit/Si Solarzellen liegen deutlich über Si-Mainstream ~ 23-26%
- Kaufbare Solarmodule liegen bei 21%-25%
- Potentieller Tandempartner für Si-Solarzellen, sinnvoll für evolutionäre PV Entwicklung 2024:33,9%



Quelle: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2023/04/07_IEA_Task13_Workshop_6th_Oct._22_Josh_Stein_Perovskite_and_tandem_degradation_challengesand_mitigation_strategies.pdf

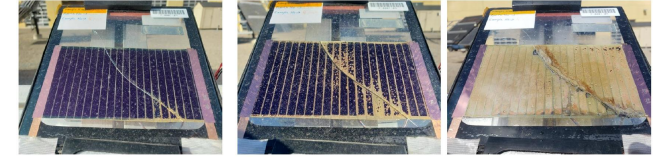
- Giftige Elemente (Pb)
- Hohe Ionenbeweglichkeit im Kristall
- Hohe Ausdehnungskoeffizienten im Vergleich zum Silizium
- Feuchte und Sauerstoff empfindlich
- Kristallphase instabil im PV Anwendungsbereich
- Weiches Material

Feuchte- und Sauerstoffempfindlichkeit



S. Baumann et al., *Energy Environ. Sci.*, 2024, doi: 10.1039/D4EE01898B

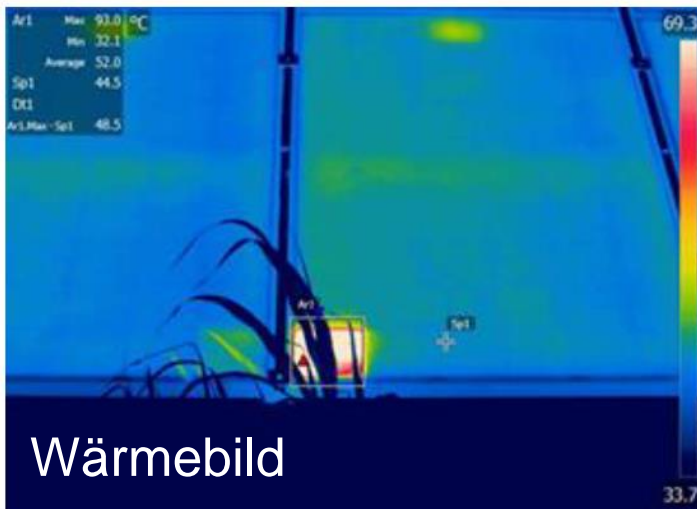
Herausforderungen



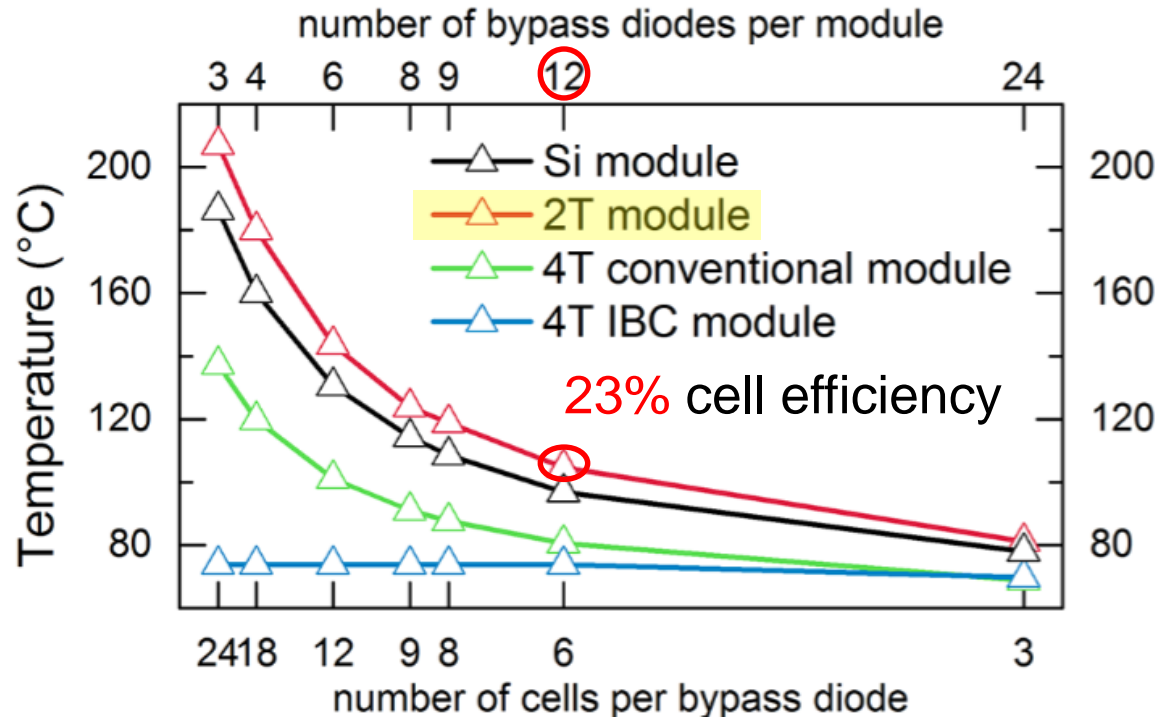
- Perovskite reagieren mit Wasser und bilden unerwünschte Phasen
- Sauerstoff oxidiert mit organische Komponenten, was zum Ausblühen von unerwünschten Phasen führt

Lösung

- Verwenden von Wasserabweisende Oberflächen und Zwischenschichten
- Mittels Glasschweißen, die Solarmodule zwischen zwei Glasplatten einschweißen

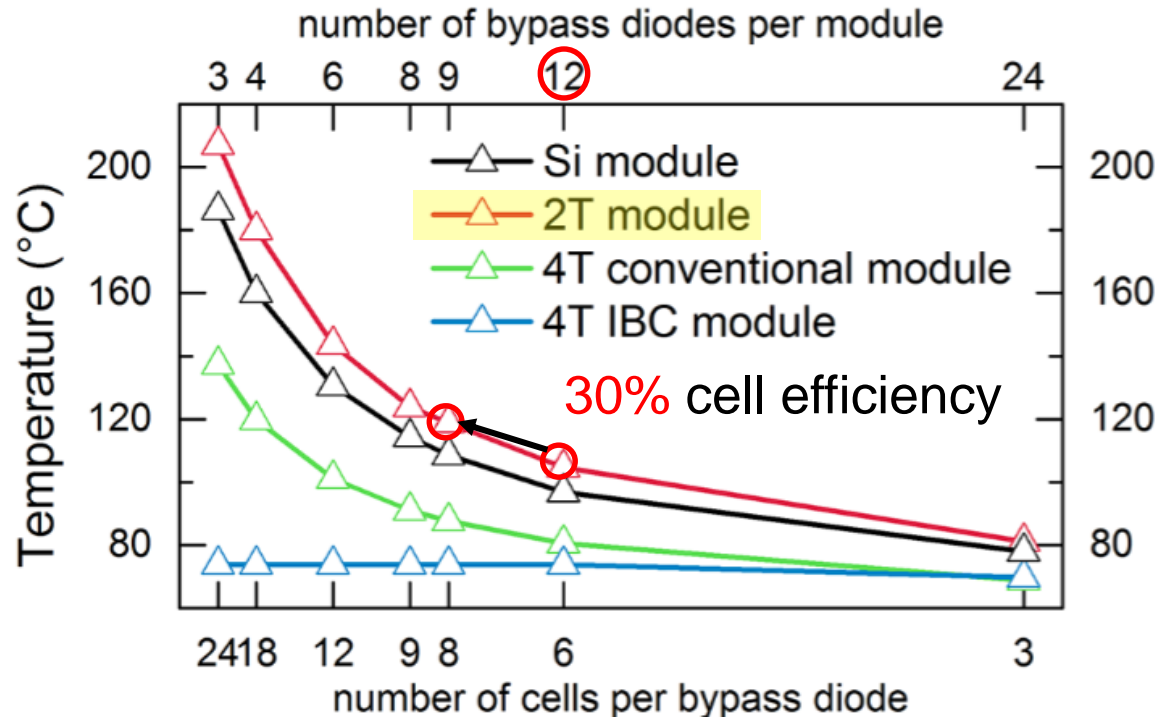


- Maximaltemperatur wird bei Verschattung erreicht
- Verschattete Solarzellen arbeiten als elektrische Last
- Um hohe thermische Lasten zu vermeiden, sind meist zwei Reihen von Solarzellen mit einer Bypassdiode geschützt
- Dennoch kann die Energie aus zwei Reihen Solarzellen an z.B. eine verschattete Solarzelle übertragen werden
- Diese Energie kann eine Solarzelle bei konventionellen Modulen auf bis zu ca. 180°C aufheizen
- Außerdem arbeitet die verschattete Solarzelle mit umgekehrter Spannung (V_r)
- Sowohl eine Temperatur von 180°C als auch umgekehrte Spannung V_r überstehen aktuelle Perowskitsolarzellen nicht



J. Qian, A. F. Thomson, Y. Wu, K. J. Weber and A. W. Blakers,
ACS Appl. Energy Mater., 2018, 1, 3025–3029.

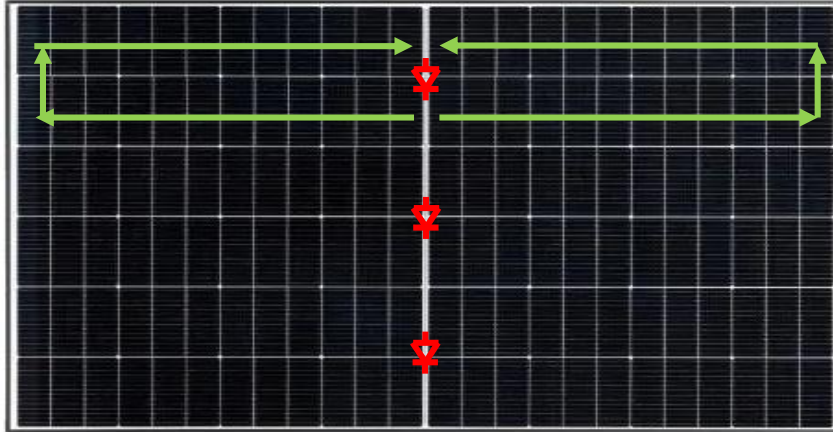
- Bypassdioden (BPD) im Modul verhindern im Verschattungsfall, dass Solarzellen mit zu hoher Verlustleistung als Verbraucher arbeiten
- Deshalb hängt das obere Temperaturlimit der Zellen von der Anzahl der Zellen pro BPD ab
- Mit 12 BYD und 6 Zellen pro String ist $T_{\text{limit}} \sim 105^\circ\text{C}$, bei 23% Tandem Effizienz
- Höhere Zelleffizienzen führen zu höherem T_{limit}



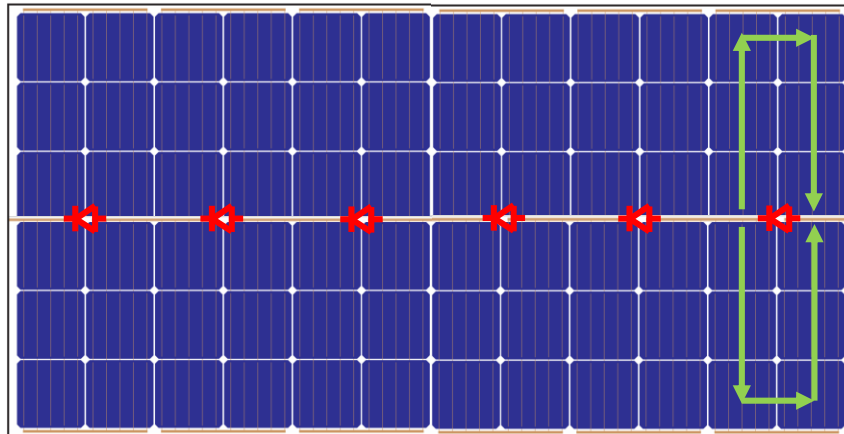
J. Qian, A. F. Thomson, Y. Wu, K. J. Weber and A. W. Blakers,
ACS Appl. Energy Mater., 2018, 1, 3025–3029.

- Bypassdioden (BPD) im Modul verhindern im Verschattungsfall, dass Solarzellen mit zu hoher Verlustleistung als Verbraucher arbeiten
- Deshalb hängt das obere Temperaturlimit der Zellen von der Anzahl der Zellen pro BPD ab
- Mit 6 BYD und 12 Zellen pro String ist $T_{\text{limit}} \sim 105^{\circ}\text{C}$, bei 23% Tandem Effizienz
- Höhere Zelleffizienzen führen zu höherem T_{limit}
- Für 30% Zellwirkungsgrad würde man geschätzt $T_{\text{limit}} \mathbf{120^{\circ}\text{C}}$ erreichen
- Bisher werden MHP für max. 85°C ausgelegt

Aktuell
Si:



Neues
Design
Pero/Si:

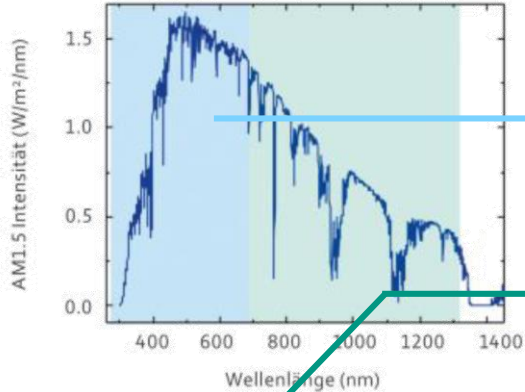


- Aktuell werden 3 BYD im PV-Modul verwendet
- 12 BYD wären zu viele BYD
- Lösung: Parallelschaltung von zwei Strings
- Dann werden nur 6 BYD pro Modul benötigt
- Rückwärtsspannung über verschatteter Tandemzelle entspricht der Spannung von 5 Zellen
→ $\sim 1,4 \text{ V} \times 5 = 7 \text{ V}$
- Bisherige Rückwärtsspannungsstabilität von MHP-Solarzellen liegt bei wenigen Volt
- Welche Solarzelle arbeitet als Verbraucher?

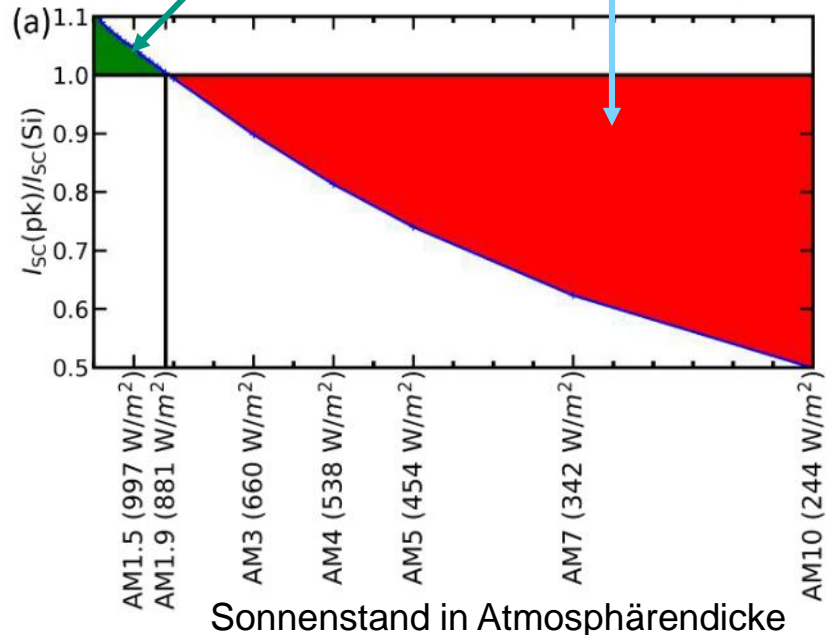
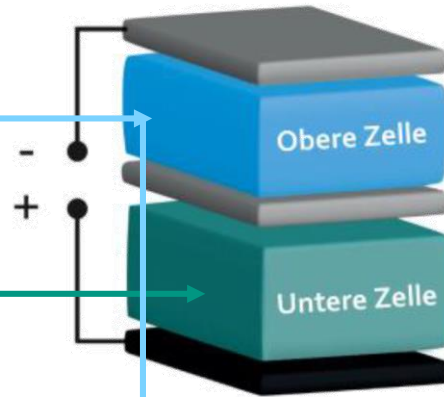
R. Witteck, M. Siebert, S. Blankemeyer, H. Schulte-Huxel, M. Köntges, and M. Kontges, "Three Bypass Diodes Architecture at the Limit," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 10, no. 6, pp. 1828–1838, Nov. 2020, doi: 10.1109/JPHOTOV.2020.3021348.

Welche Solarzelle arbeiten als elektrische Last?

Sonnenspektrum AM1,5



Tandemsolarzelle



Sonnenstand in Atmosphärendicke

- Welcher Teil einer Tandemsolarzelle bei Verschattung als elektrisch Last arbeitet ist vom Sonnenstand abhängig
- Verschattungssimulation zeigt, dass die Si Zelle in der Tagesmitte (AM1.5 bis AM 1.9) als Last arbeitet und die Perovskitzelle zu allen anderen Tageszeiten (AM>1.9)
- Z.B. bei einer Verschattung mit Vogelkot könnte eine Perovskit-Solarzelle den Großteil des Tages als Last arbeiten
- Lösungspfad: MHP mit einer Durchbruchspannung für 6 Vollzellen pro BPD entwickeln $\rightarrow V_r > 7 \text{ V}$ bei $\sim 120^\circ\text{C}$

Perovskite sind nicht stabil im Anwendungsbereich



	MHP Composition	Band gap	Stable*	Comments on phase stability	Conclusions
Single-Cation	CsPbI ₃	1.77 eV ¹³¹	≥ 35 °C ¹³²	Rather low efficiency, prone to phase change to inactive compound and air sensitive, but higher heat & moisture resistance and photostability compared to organic MHP	Multi cation or other stabilization methods needed to obtain stable structures in whole operating temperature range
	FAPbI ₃	1.47 eV ¹³¹	Not @RT ¹³ , but @150 °C	Higher heat resistance compared to MAPbI ₃ High reported SJ efficiencies	
	MAPbI ₃	1.55 eV ¹³¹	Not @ 75 °C + illum. ¹³⁰	Stable in operating temperature range in the dark, Phase stable, but degradation under heat + light	
	MAPb(I _{0.8} Br _{0.2}) ₃	1.66 eV ¹³³	Not @ 75 °C + illum.	Improved moisture stability compared to MAPbI ₃ ¹³⁴ as water adsorption increased for I compared to Br ¹³³ Halide segregation for Br/I > 0.2 ⁴⁴ (e.g., Fig. 4 in ¹³⁴)	
Single-Halide (iodine)	FA _{0.8} MA _{0.2} PbI ₃	1.53 eV ¹³⁵	@RT up to ~ 25% MA ¹⁹	MA exhibits low light + heat and moisture resistance, stability to be investigated for whole operating temperature range	MA-free MHP might have increased light + heat & moisture resistance ¹³⁶ Triple cations might be more stable against phase segregation compared to double cation MHP ^{44,45}
	Cs _{0.15} FA _{0.85} PbI ₃	1.51 eV ¹³⁷	Probably up to ~ 18% Cs (see Fig. 6a in ¹⁹)	Higher structural stability, increased heat & moisture resistance compared to MA-based MHP Cation segregation under 1 sun illum. was observed for Cs _{0.15} FA _{0.85} PbI ₃ (with PbI ₂ residues in the as-deposited state) ⁴⁵	
	Cs _{0.10} FA _{0.85} MA _{0.05} PbI ₃	1.56 eV ¹³¹	@RT (see Fig. 6b in ¹⁹)	Cs _{0.091} FA _{0.728} MA _{0.152} PbI ₃ same Goldschmidt tolerance factor as Cs _{0.15} FA _{0.85} PbI ₃ , but more stable against cation segregation under 1 sun illum. ⁴⁵ , probably lower heat resistance due to MA decomposition	
Multi cation – multi halide	FA _{0.85} MA _{0.15} Pb(I _{0.85} Br _{0.15}) ₃	1.63 eV ²⁶	To be investigated	Higher heat resistance compared to MAPbI ₃ ¹³⁹ Stability under constant illum. highly depending on film morphology/processing ²⁶ ; more prone to phase segregation than Cs/FA or MA/FA/Cs MHPs ⁴⁴	Br to increase band gap to be suitable for MHP/Si tandems
	Cs _{0.17} FA _{0.83} Pb(I _{0.73} Br _{0.27}) ₃	1.72 eV ⁴³		Stable under 1.5 sun illum. ⁴³ Higher heat resistance than with MA	
	Cs _{0.05} FA _{0.8} MA _{0.15} Pb(I _{0.75} Br _{0.25}) ₃	1.68 eV ¹³⁸		Triple cations (high crystallinity) might be most promising in terms of preventing halide segregation ⁴⁴	High Br/I ratio may lead to halide segregation
	Cs _{0.17} FA _{0.83} Pb(I _{0.6} Br _{0.4}) ₃	1.75 eV ⁴²		CsFA allows higher Br/I ratios without phase segregation compared to MA (still less than 50% @0.5 sun illum.) ¹³⁹	Increase band gap by high Cs ratio instead of Br; probably less phase segregation
	Cs _{0.4} FA _{0.6} Pb(I _{0.7} Br _{0.3}) ₃	1.75 eV ⁴²		Probably increased photostability with low Br and high Cs ratio ³³ Be careful with cation segregation See Fig.1g in ³³ for exact impact of Cs/Br ratio on band gap	
Triple Halide	e.g. Cs _{0.22} FA _{0.78} Pb(I _{0.85} Br _{0.15}) ₃ + 5% MAPbCl ₃ ⁵⁹	1.67 eV ⁵⁸		Optimal band gap for MHP/Si tandem solar cells Increased stability under light + heat ⁵⁸	Triple halide might be less prone to halide segregation

- Für einfache Modulaufbauten benötigt man deshalb eine stabile Perovskitkomposition für den Temperaturbereich von -40°C bis ~120°C für 30% Zellwirkungsgrad bei 6 Zellen pro Bypassdiode
- Bisherige Temperaturbereich -40°C – 85°C
- Deshalb werden neue MHP Kompositionen erforderlich
- Außerdem muss die Perovskitsolarzelle Rückwärtsspannungen von >7 V überstehen
- Hierfür müssen neue Perovskitabsorber entwickelt und getestet werden

*e.g., phase stable for Goldschmidt tolerance factor between 0.85 - 1.0 in operating temperature range (-40 °C to +85 °C) or thermodynamically calculated stable alloying

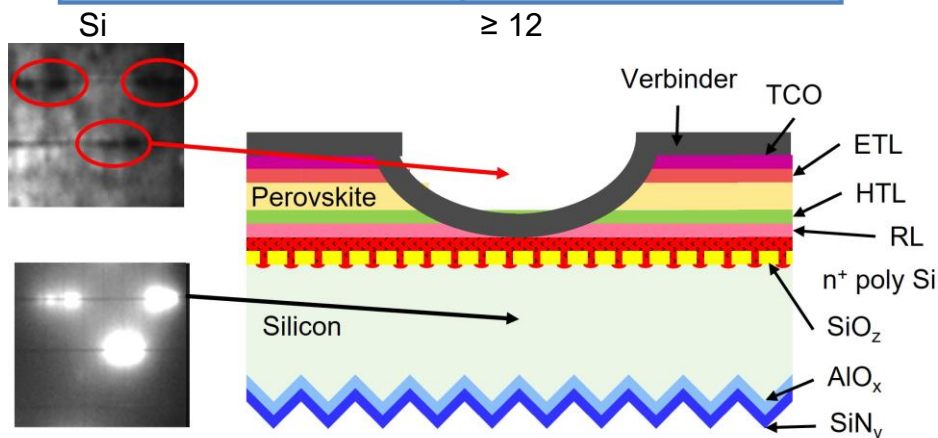
MHP structure	Hardness [GPa] from nanoindentation depending on crystal orientation
2D Layered $(C_6H_5CH_2NH_3)_2PbCl_4 \cdot H$	0.27-0.38 ¹²⁸
MAPbI ₃	0.42-0.46 ¹²³ , 0.47 ¹²⁵ , 0.55-0.57 ¹²⁴ , 0.76 ¹²⁹ , 1.0 ¹³⁰
MAPbCl ₃	0.25 – 0.29 ¹²³
MAPbBr ₃	0.26 – 0.31 ¹²³ , 0.32 ¹²⁵ , 0.36 ¹²⁴ , 0.54 ¹²⁹
CsPbBr ₃	0.34 ¹²⁴
MAPbI _{0.1} Br _{2.9}	0.63 ¹²⁵
MAPb(I _{0.7} Br _{0.3}) ₃	0.57 ¹²⁵
FA _{0.23} MA _{0.77} PbBr ₃	0.37 ¹²⁵
FA _{0.54} MA _{0.46} PbBr ₃	0.43 ¹²⁵
FAPbBr ₃	0.36 ¹²⁵

Herausforderung

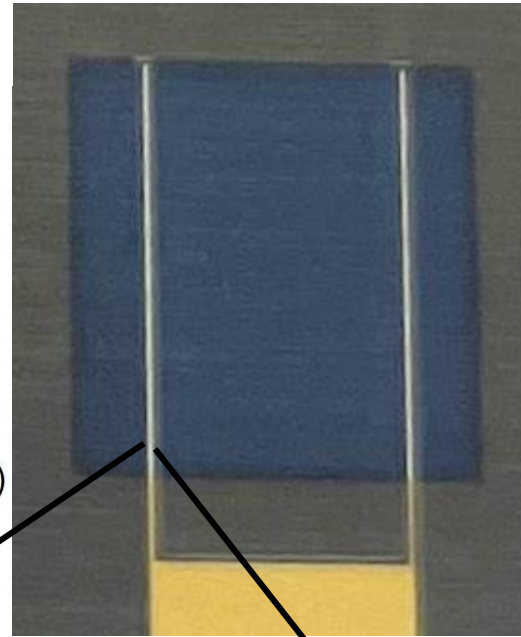
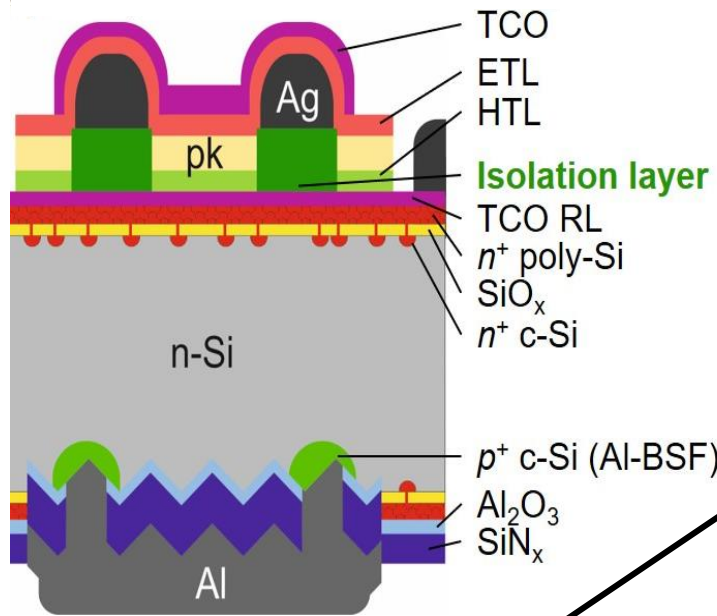
- MHP Schichten haben geringe Härte
- MHP Schichten müssen gegen mechanische Belastung geschützt werden
- Zellverbinder können MHP Schichten durchstechen und kurzschließen

Lösung

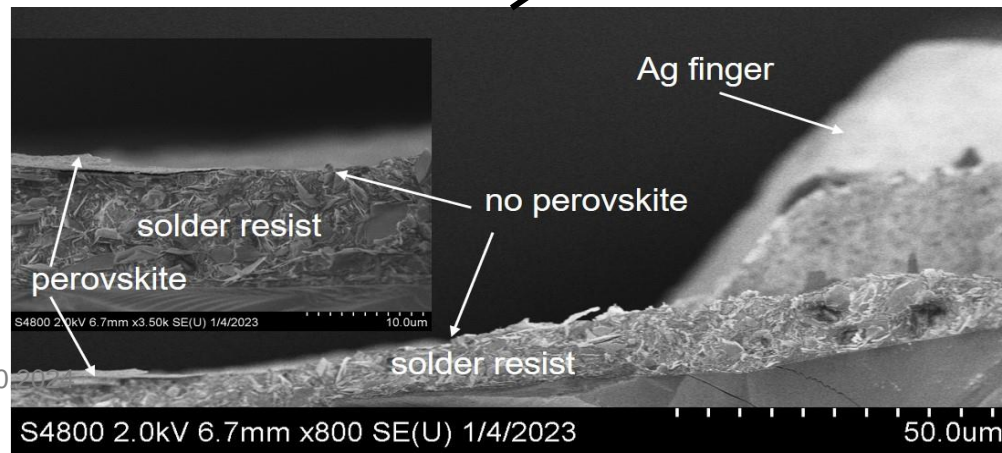
- Stress auf Kontakte mit Klebekontakten reduzieren
- Verwendung von weichen Einbettmaterialien
- Isolationsschichten unter Kontaktstellen können Schichten vor Kurzschlüssen schützen



MHP Schicht vor mechanischem Stress schützen



- Isolationsschicht unter Silberfinger
- Isolierter Ag busbar kann mit Verbinderbändchen kontaktiert werden
- Keine mechanische Last auf MHP Schichten
- Entkopplung von Metallisierungs Prozesstemperatur und MHP Herstellung
- Höhere Leitfähigkeit und schnellerer Prozess für Ag Finger Herstellung
- Keine Kurzschlüsse möglich



S. Baumann, et al, proceedings *IEEE 50th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2023.
doi: 10.1109/PVSC48320.2023.10359983.

- Viele Herausforderungen (H_2O , O_2 , UV) können durch geeignete Modulverkapselung gelöst werden
- Das Solarmoduldesign muss angepasst werden, um im Verschattungsfall geringe Zelltemperaturen zu gewährleisten ($-40^{\circ}C$ bis $120^{\circ}C$)
- Die Stabilität der verwendeten MHP Absorber muss für diesen Anwendungsbereich weiterentwickelt werden
- Die mechanische Belastung auf dem Zellstapel kann durch das Einführen von Isolationsschichten unter Metallkontakten wesentlich reduziert werden
- Es müssen viele weitere Herausforderungen bzgl. der Zuverlässigkeit erfüllt werden, die hier nicht genannt wurden
- Analyse wurde nur über Literaturquellen durchgeführt, Herstellerentwicklungen sind nicht bekannt.

- Es müssen alle Herausforderungen in einem Produkt gleichzeitig kosteneffizient gelöst werden
- Um Perov/Si in den Markt zu bringen muss mehr Entwicklungsaufwand in die Zuverlässigkeit investiert werden

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

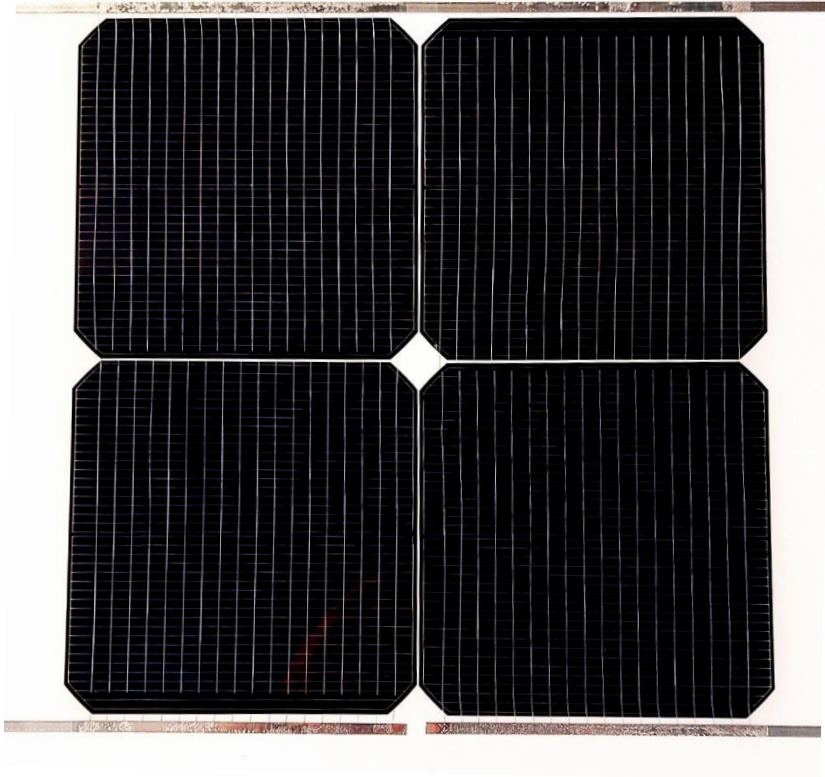


Photo eines 4-Zellen-Minimoduls

- Laminationsprozess für Modulintegration von Pk/Si-Tandemsolarzellen (OxfordPV) angepasst
Modul mit einer Zelle 25,1±1,0%
Modul mit 4 Zellen 24,6±2,2%
- Der Wirkungsgrad mit 4 Zellen ist so hoch wie das effizienteste Standard Si-Solarmodul im Markt.
- **Pk/Si-Tandems** erreichen höhere **Zelle-zu-Modul-Faktoren** (J_{sc} , η) als Si-Referenzmodule