

Organische Photovoltaik

Uli Würfel

KIT, 23. Februar 2024

Agenda

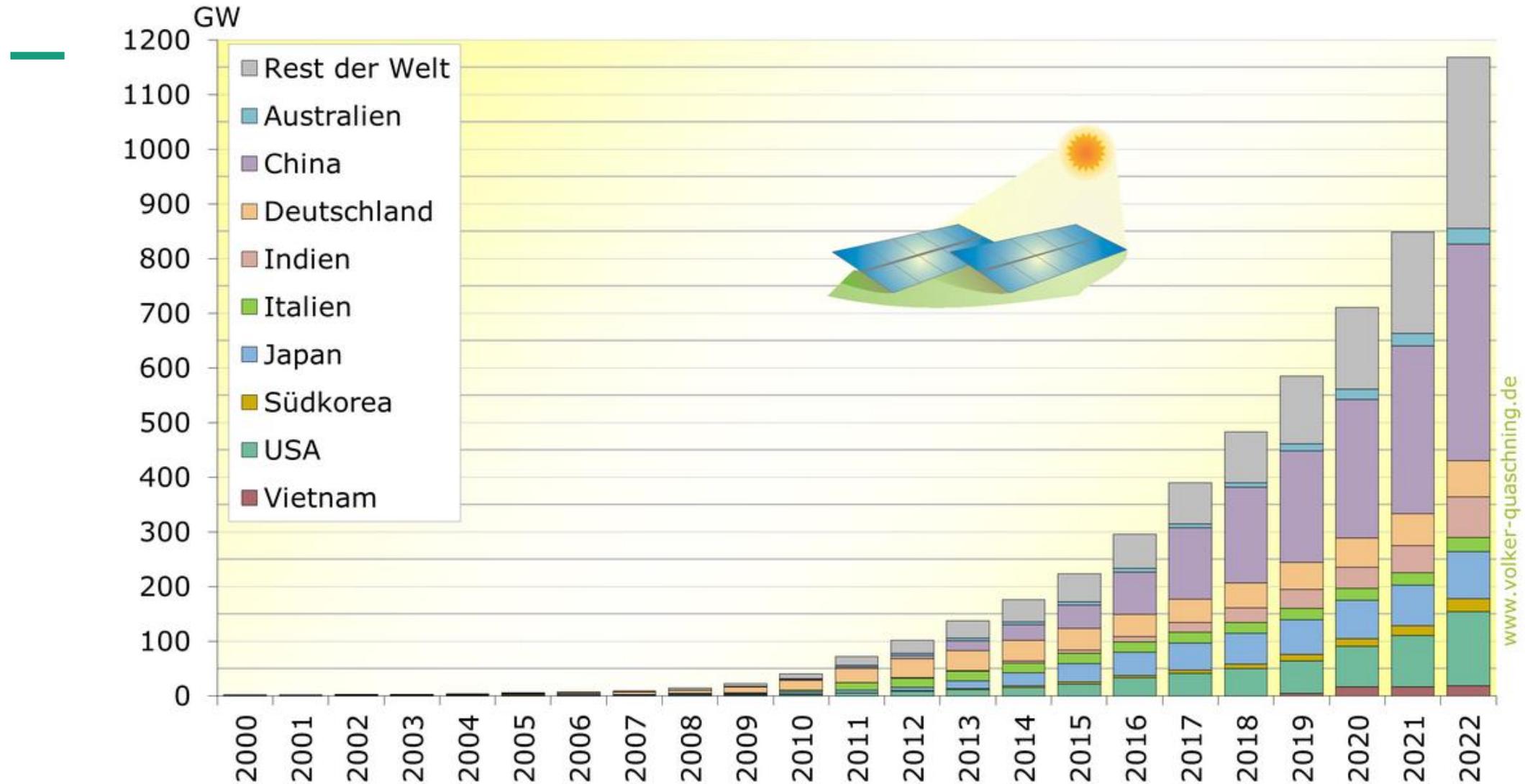
1. Allgemeines zur Photovoltaik

2. Organische Photovoltaik

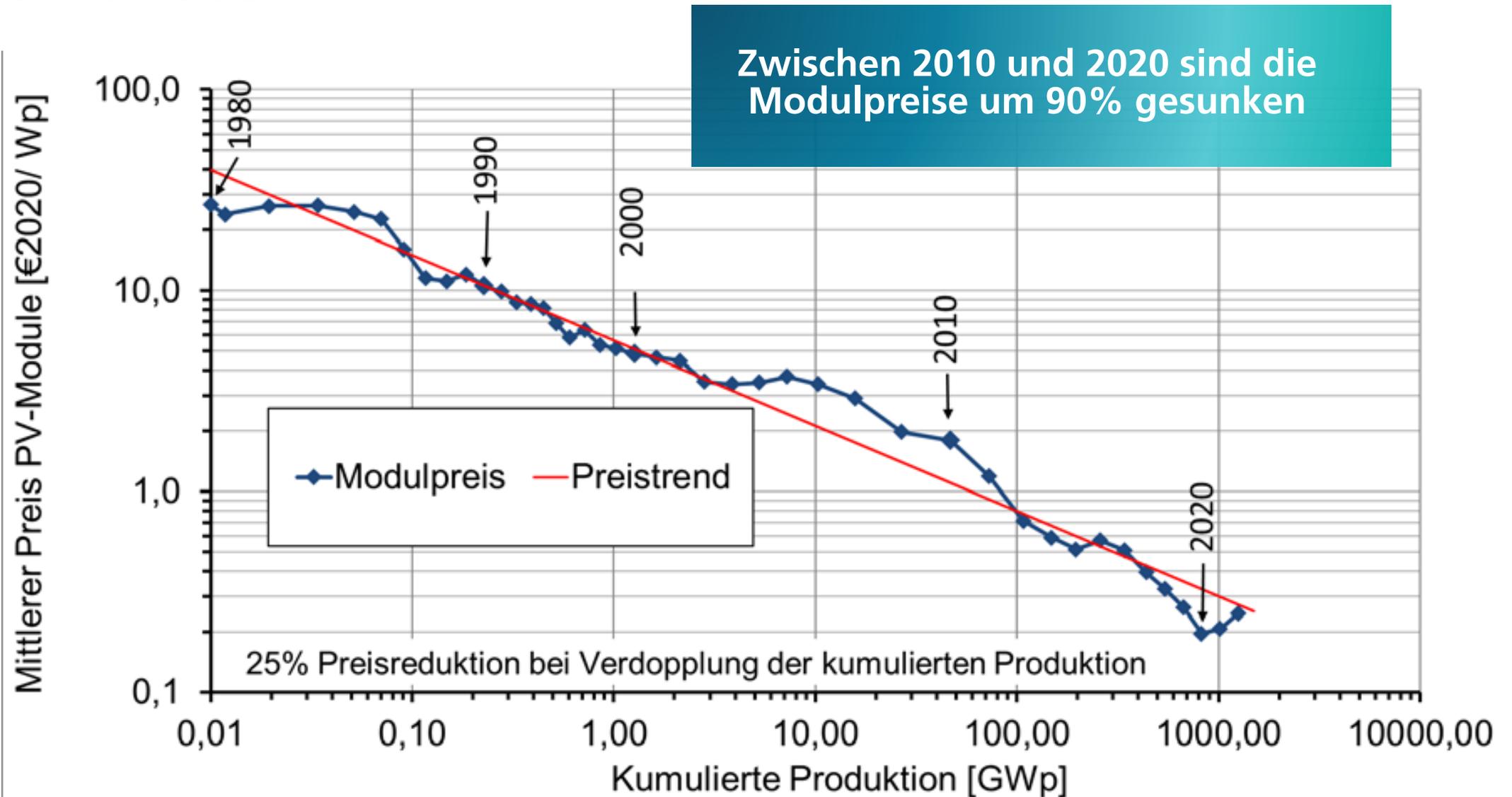
- Einführung
- OPV als Energieversorgung für IoT
- Transparente OPV

3. (Transiente) Lumineszenz an organischen Solarzellen

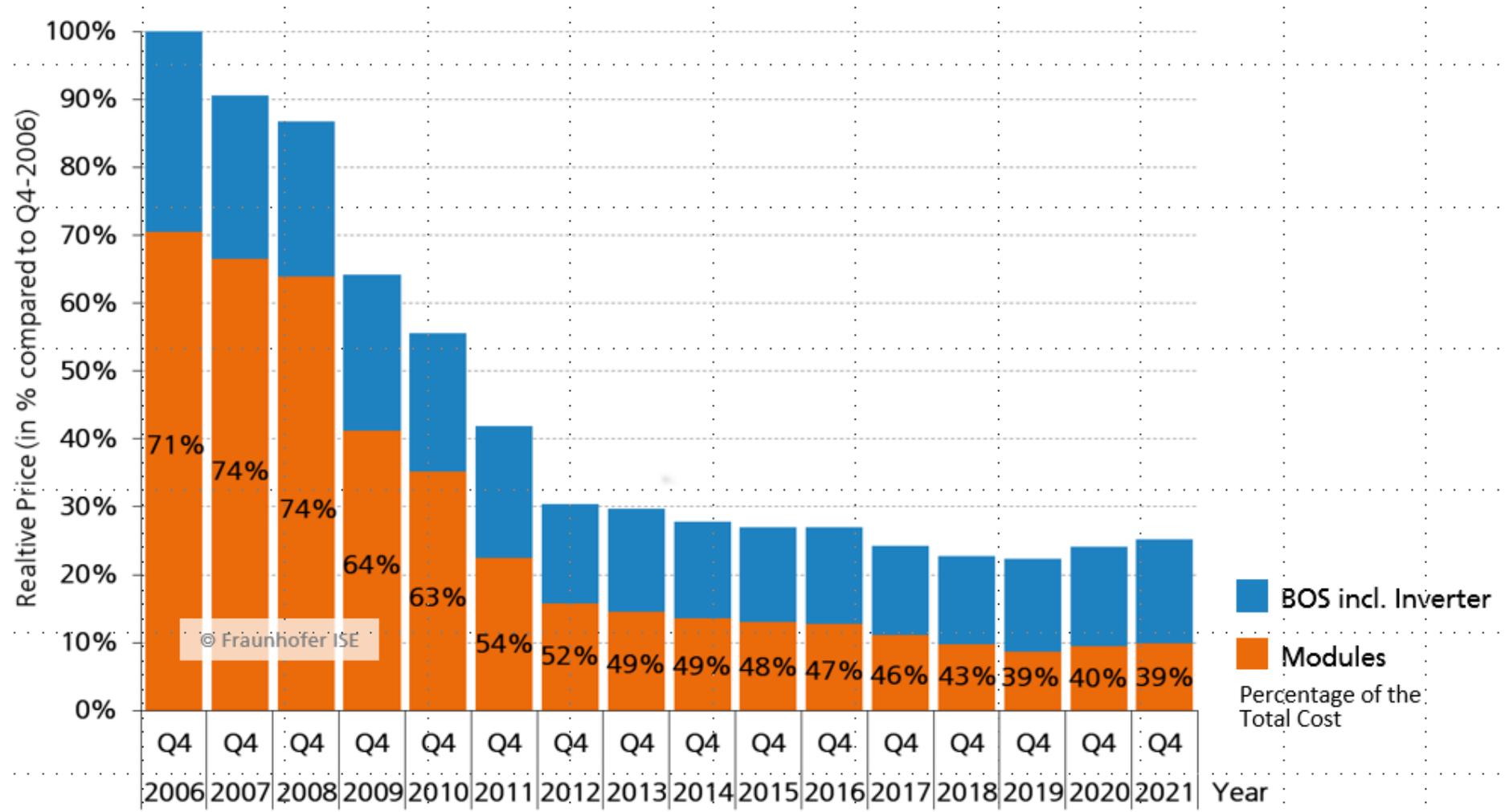
Kumulierte, weltweit installierte PV-Leistung



Die Lernkurve der PV



Efficiency Rules...



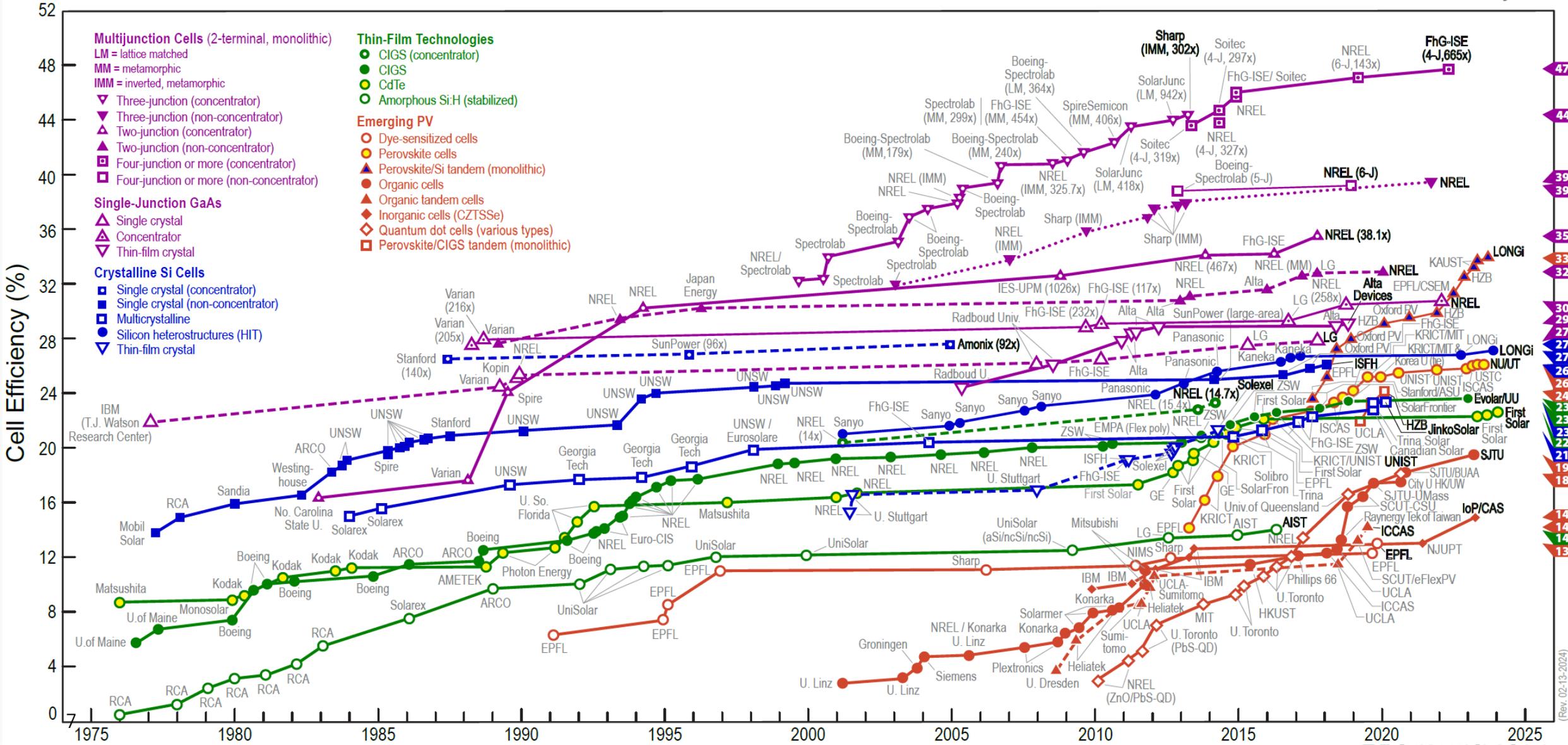
Fakten zur PV

- International wurde PV-Strom an Standorten mit hoher Solarstrahlung bereits zu Tiefstpreisen bis 1,12 €ct/kWh (Portugal) und 0,87 €ct/kWh (Saudi-Arabien) angeboten
- Letzte Auktion in Deutschland im Bereich 100 MW: < 6 €ct/kWh Vergütung
- Zum Vergleich: für das geplante Atomkraftwerk „Hinkley C“, das im Jahr 2025 in Großbritannien in Betrieb gehen soll, wurde eine Einspeisevergütung von umgerechnet 12 €ct/kWh zuzüglich Inflationsausgleich über die Dauer von 35 Jahren garantiert

Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland

Aktuelle Fassung abrufbar unter www.pv-fakten.de

Best Research-Cell Efficiencies



Organische Solarzellen

Einführung

- Organische Halbleiter werden in Lösung gebracht und können dann durch verschiedene Beschichtungs-/Druck-Technologien aufgebracht werden
- Die Trocknung findet bei niedrigen Temperaturen statt ($<130^{\circ}\text{C}$) → es können flexible Substrate verwendet werden
- Keine Schwermetalle oder andere kritische Materialien
- Sehr niedriger Energieeinsatz, folglich sehr niedriger CO_2 -eq Fußabdruck

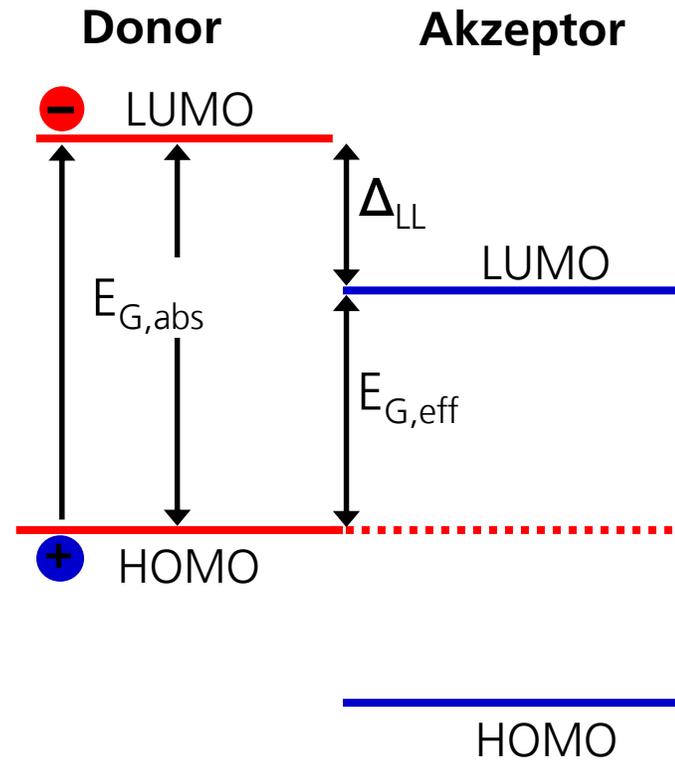
Organische Solarzellen

Einführung

	Inorganic Semiconductor	Organic Semiconductor
Chemical bond	covalent (2-8eV)	Van der Waals betw. molecules (0.001-0.01eV)
Dielectric permittivity	11.7 (Si)	3...4
Binding energy electron-hole pair after optical excitation	$< k_B T$ → free charge carriers	$\gg k_B T$ (0.4-1eV) → excitons
Charge carrier transport	band transport	hopping transport
Charge carrier mobilities / $\text{cm}^2 (\text{Vs})^{-1}$	$10^2 - 10^3$	$10^{-2} \dots 10^{-5}$
Absorption coefficient / cm^{-1}	8000 (c-Si@550nm)	1.5×10^5 (P3HT@550nm)
Typical efficiency (max. efficiency)	20-25% (27%)	12-18% (19%)

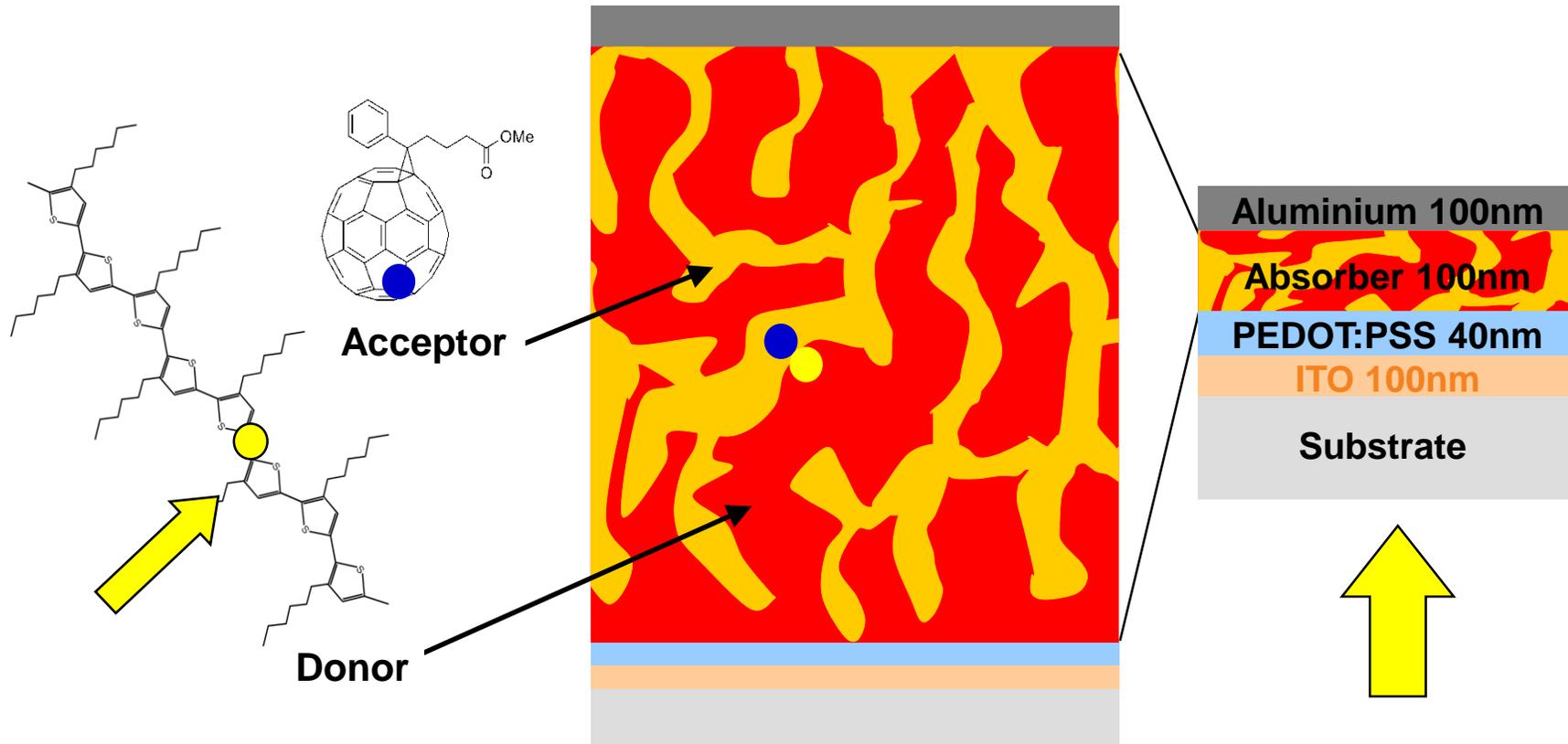
Organische Solarzellen

Einführung



Organic Solar Cells – The Bulk-Heterojunction

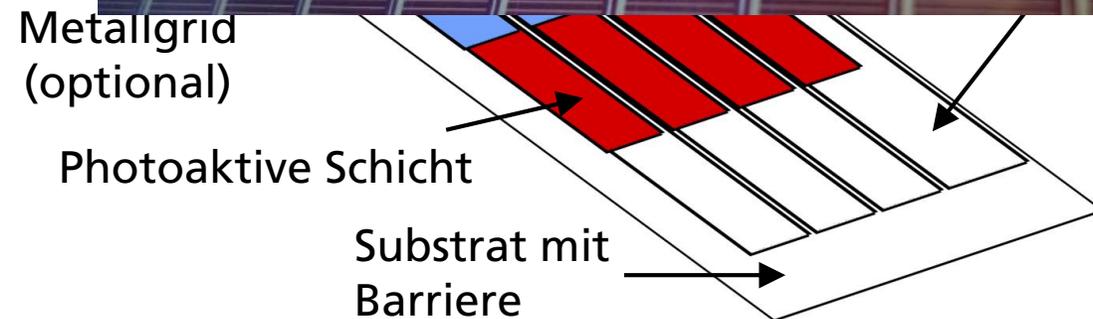
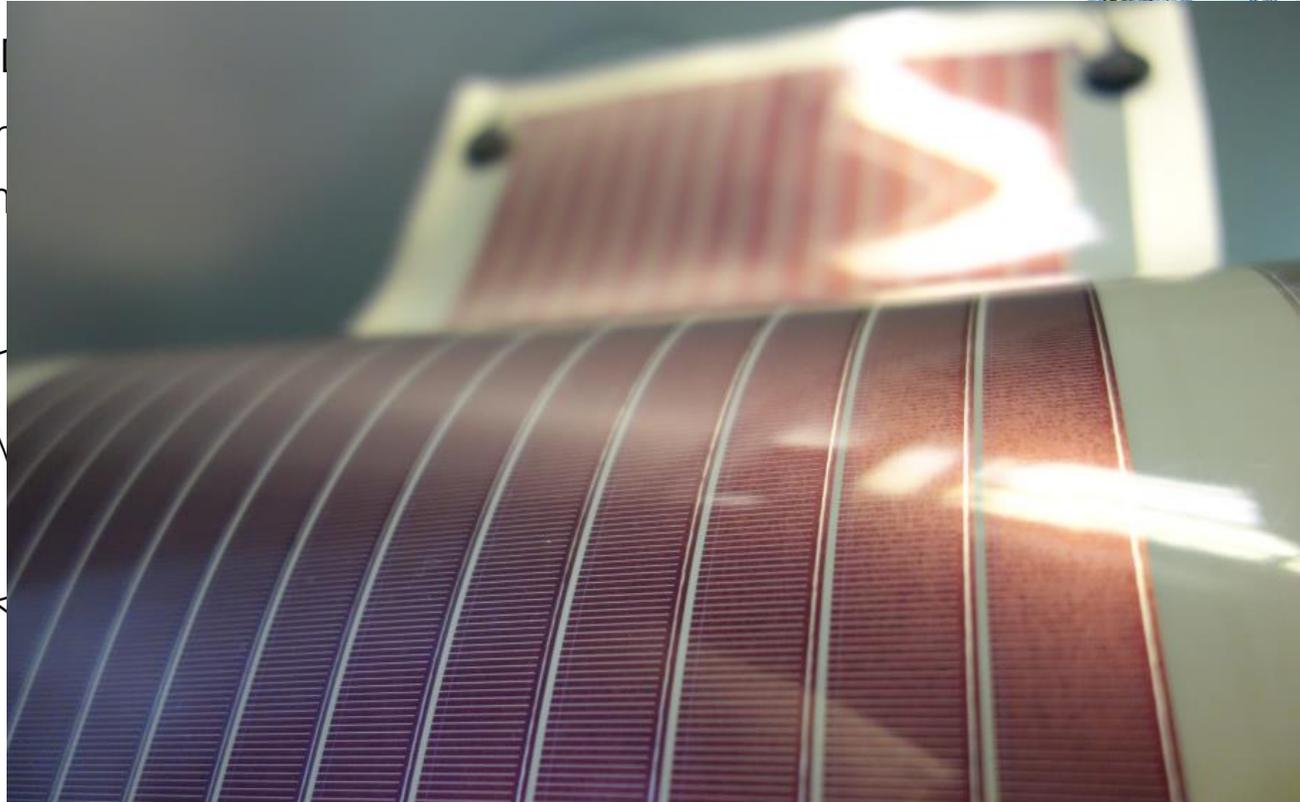
Einführung



Rolle-zu-Rolle Prozessierung

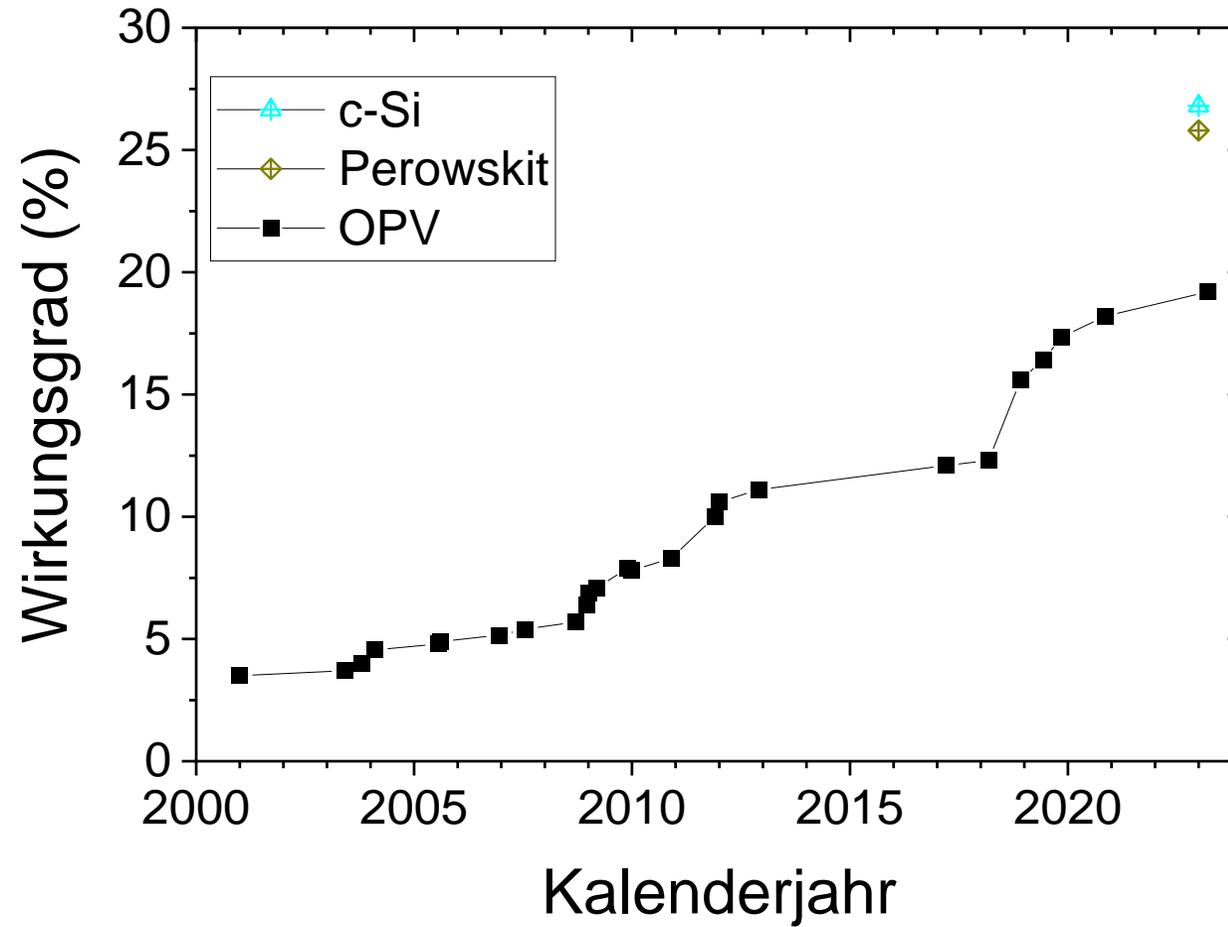
Einführung

- Hohe Produktivität
- Kostenbestimmend



Organische Photovoltaik: Entwicklung Rekordwirkungsgrade

Einführung



Organische Photovoltaik

Einführung

Es ist schwer, mit c-Si zu konkurrieren
→ Identifiziere Anwendungen, bei denen die
OPV „besser“ ist



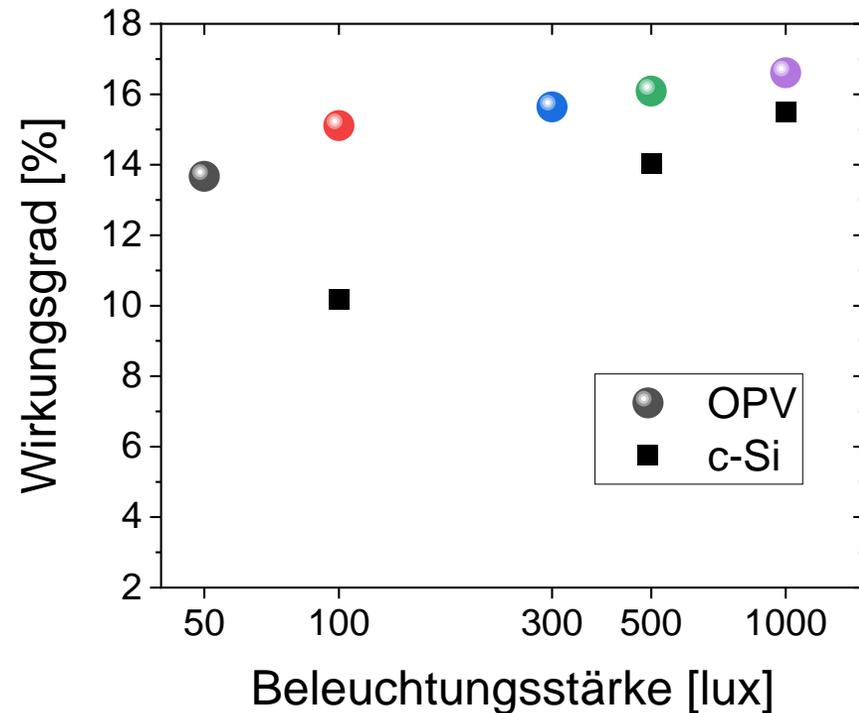
Need to go where c-Si can't go!

Organische Photovoltaik für IoT

- Retrofit des Gebäudebestands kann in Deutschland zur Einsparung von ca. 30% Energie führen
- Erfordert 'smartness' → zahlreiche Sensoren
- Organische PV bestens zur Energieversorgung dieser IoT Bauteile geeignet

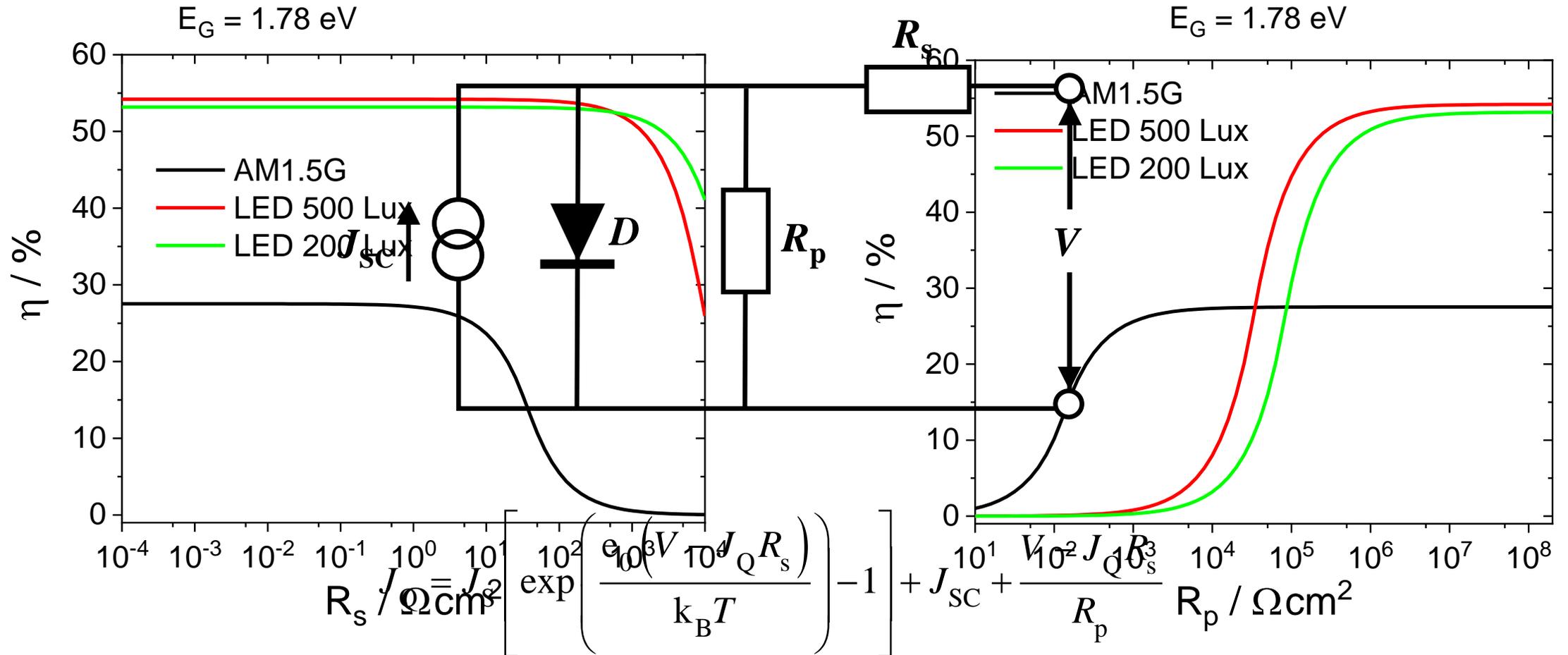
Organische Photovoltaik für IoT

- Kunstlicht in Innenräumen ist an das menschliche Auge angepasst und weist ein wesentlich schmaleres Spektrum als Sonnenlicht auf
- → Bandlücke im Bereich von 1.7...1.9 eV ist ideal
- c-Si ist nicht gut geeignet auf Grund hoher Thermalisierungsverluste

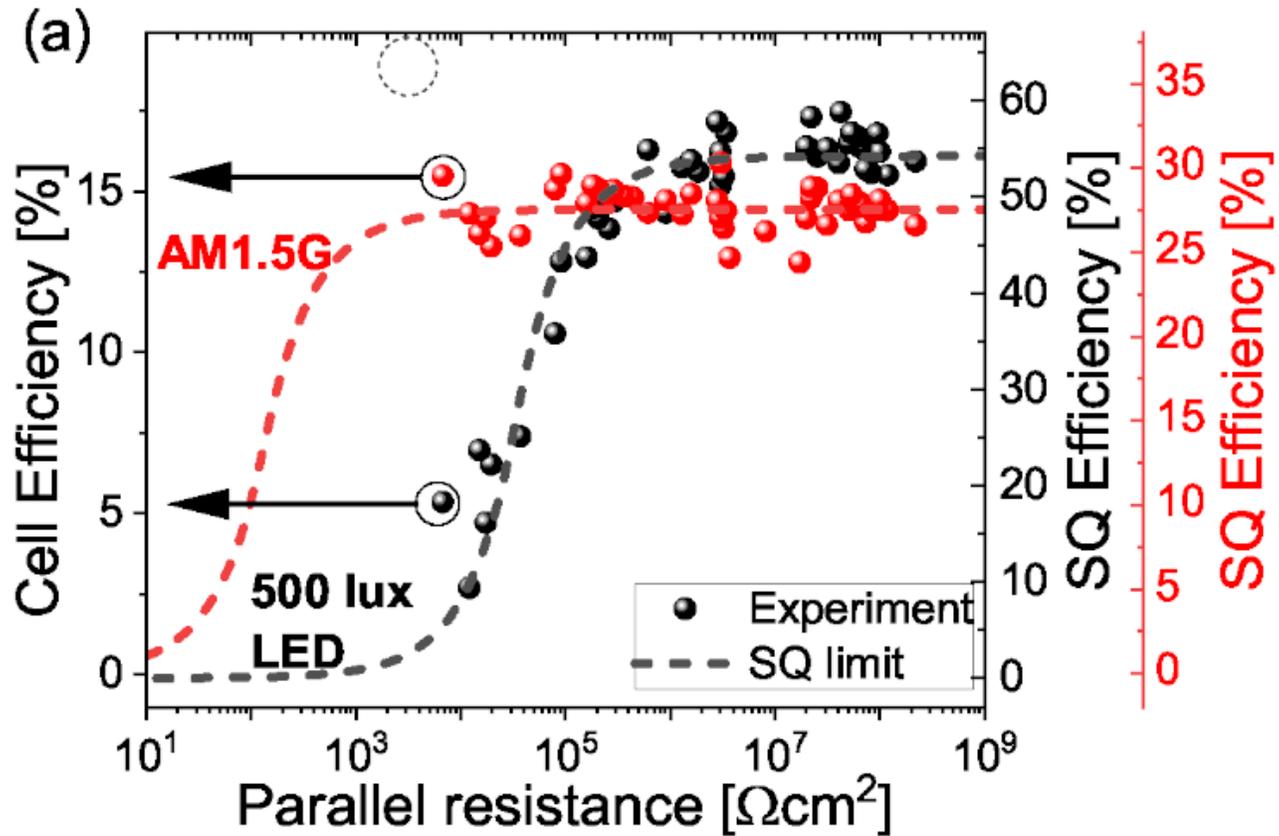


Solarzellen in Innenräumen generieren nur geringe Energiemengen...
Aber: es sind ca. 30%
Energieeinsparung möglich durch Retrofit von Gebäudebestand!

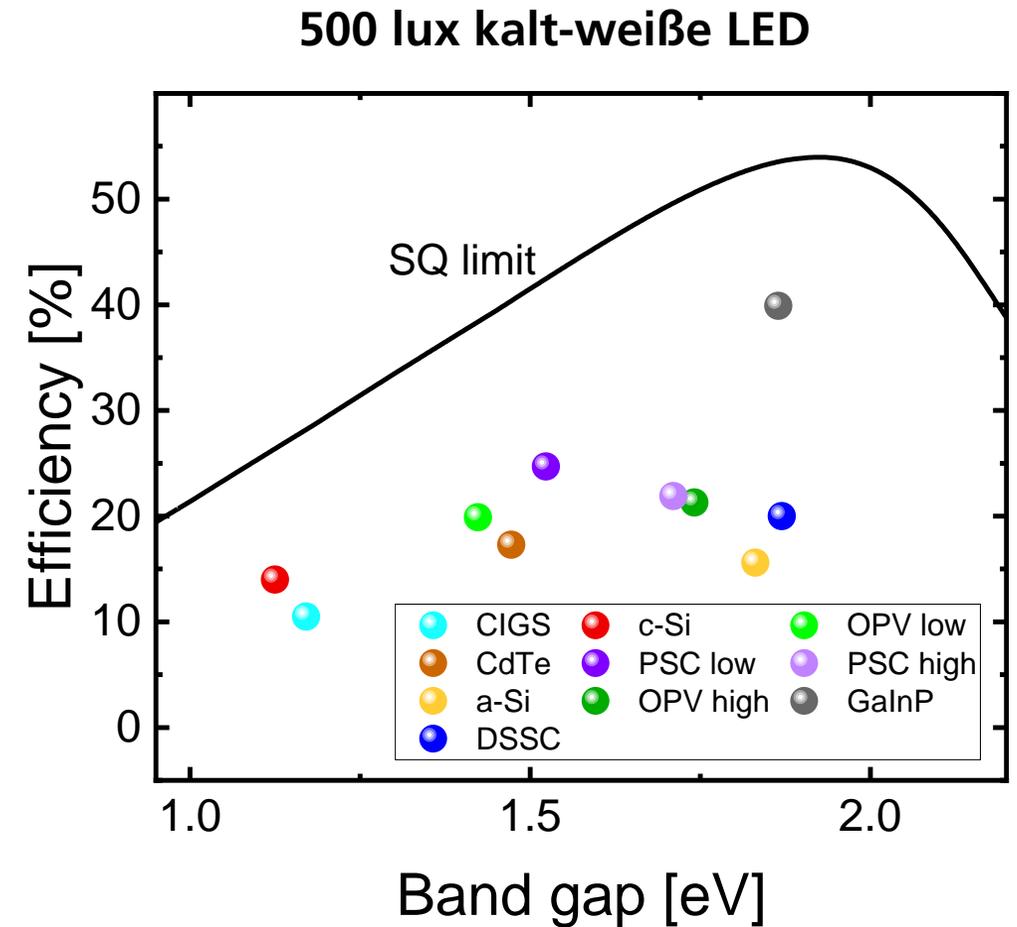
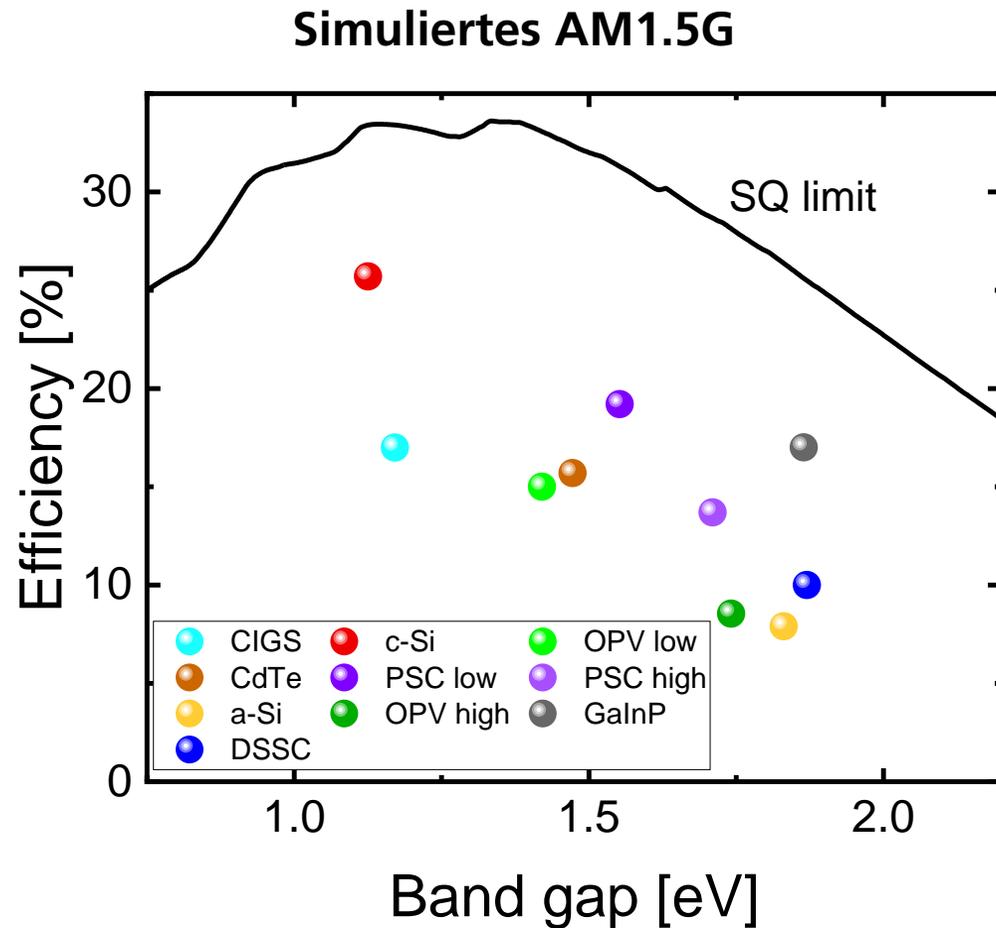
Impact of Series and Parallel Resistance



Organische Photovoltaik für IoT

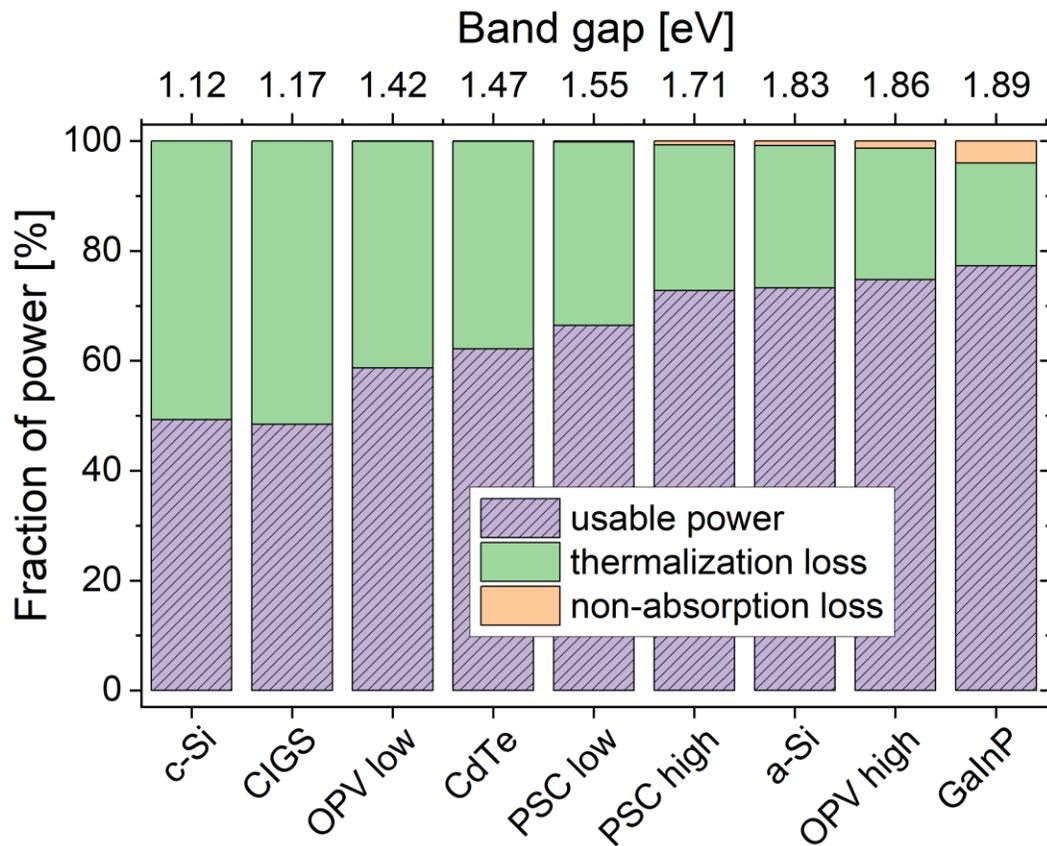


Vergleich verschiedener PV Technologien für IoT



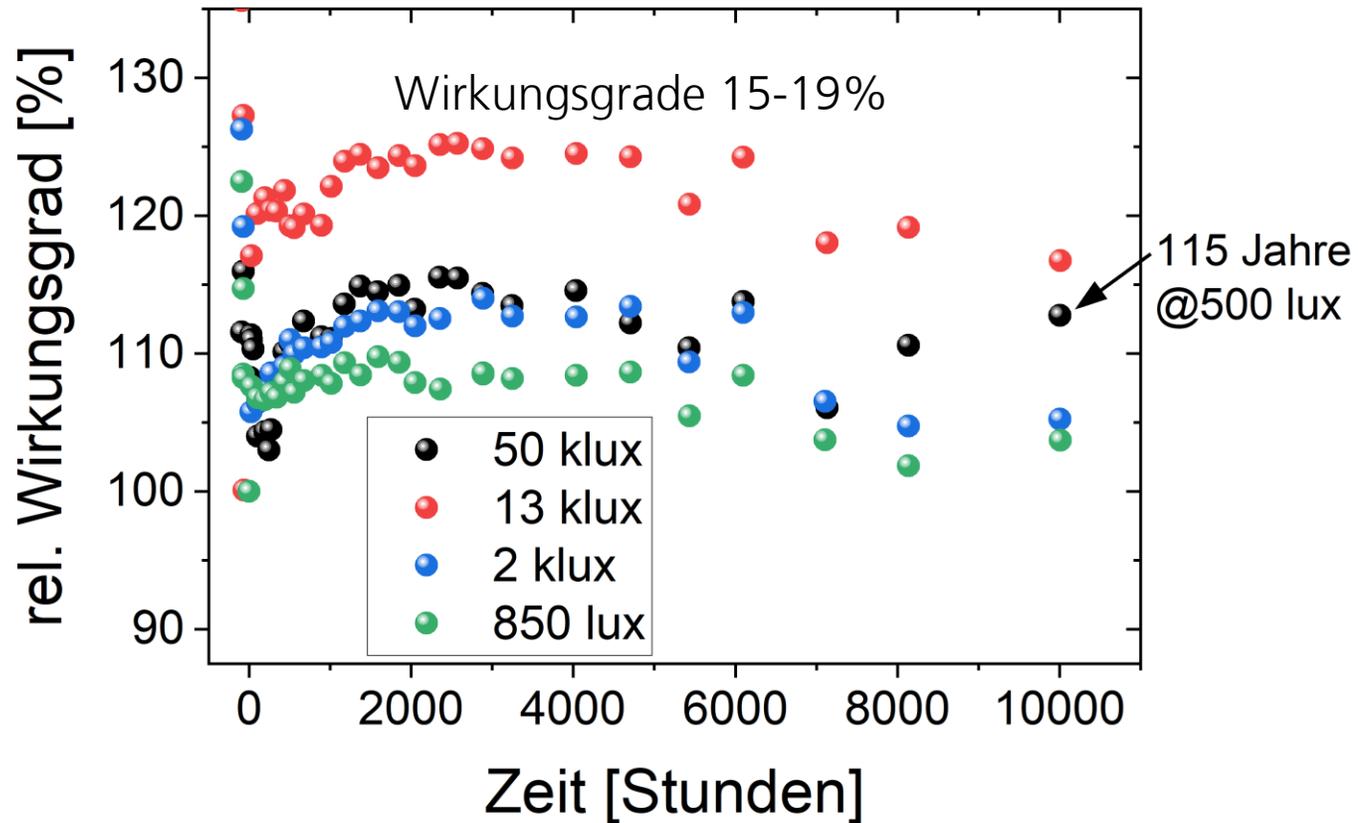
D. Müller, UW et al., *ACS Appl. Energy Mater.* **2023**, 6, 20, 10404

Vergleich verschiedener PV Technologien für IoT



D. Müller, UW et al., *ACS Appl. Energy Mater.* **2023**, 6, 20, 10404

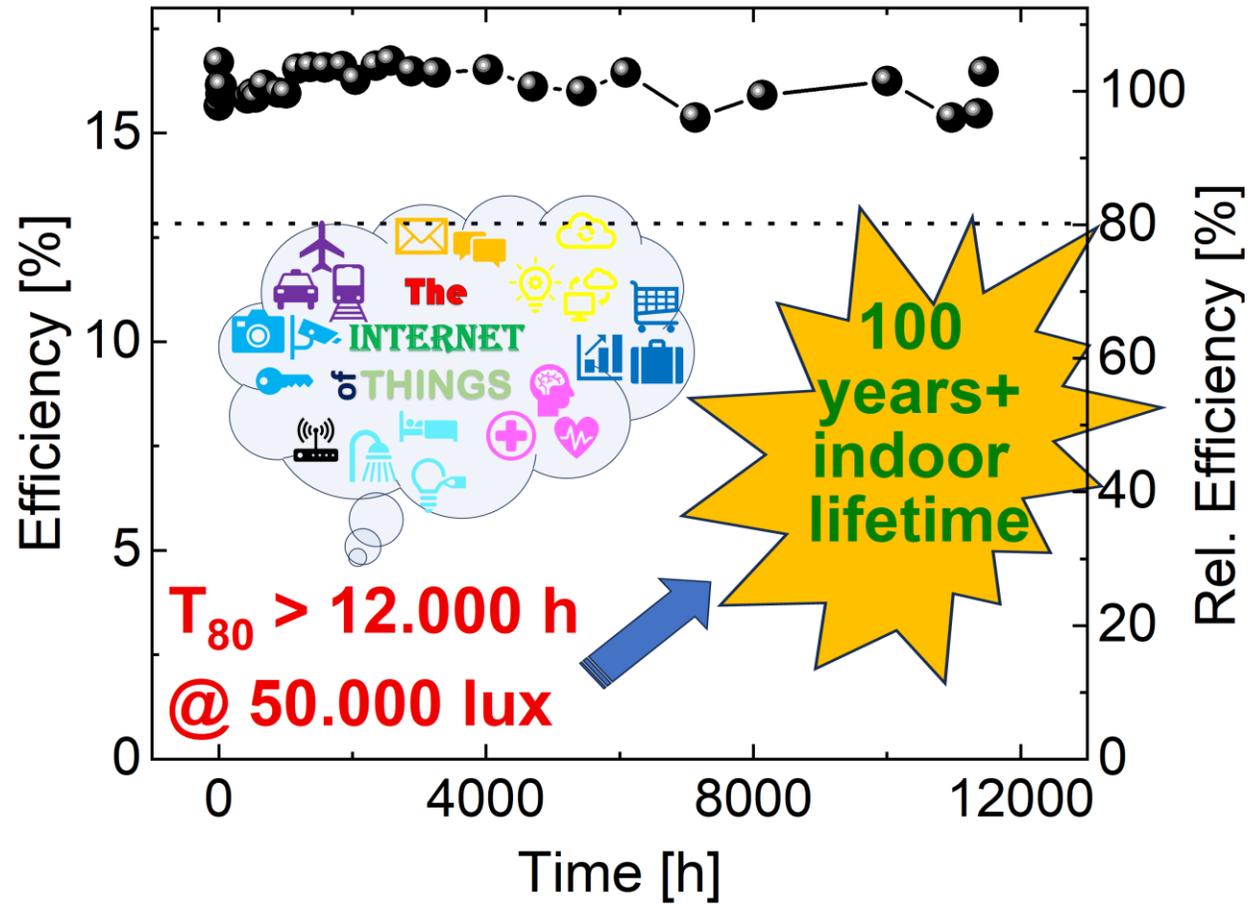
Organische Photovoltaik für IoT



OPV ist sehr gut für Anwendungen unter Kunstlicht geeignet. Die erforderliche Stabilität ist bereits erreicht und erste Produkte sind im Markt.

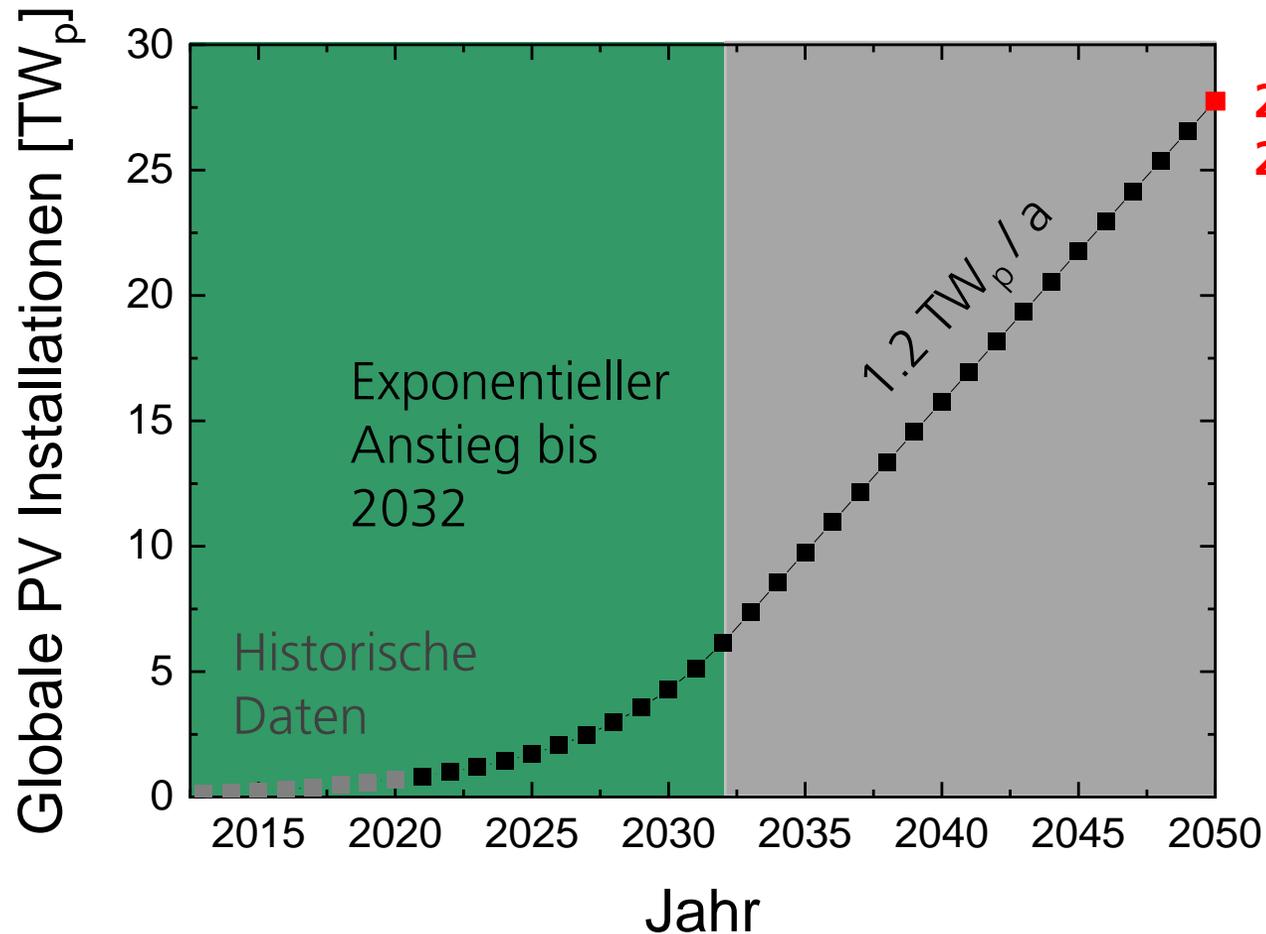
D. Müller, UW *et al.*, *Small* **2023**, 2305437

Organic Photovoltaics for IoT



D. Müller, UW *et al.*, *Small* **2023**, 2305437

SEHR VIEL PV benötigt: Szenario zur Erreichung des 2°C Ziels



2°C Ziel:
27 TW_p in 2050 (eher 50-75 TW_p)

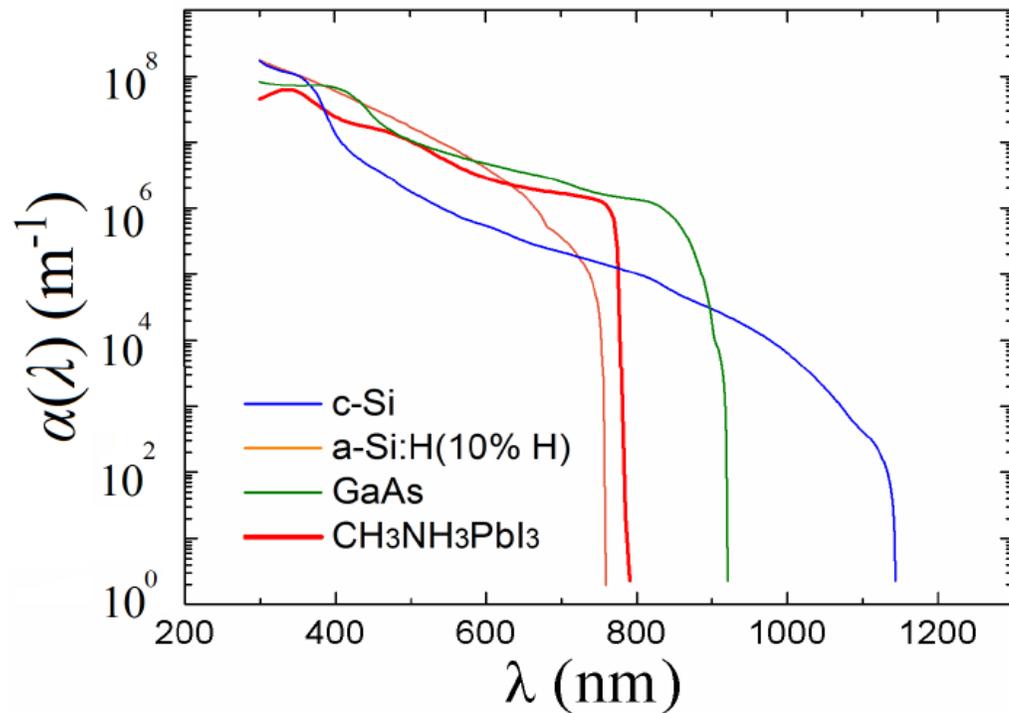
Entscheidend ist nicht nur Technologie und Wirtschaftlichkeit, sondern auch **Akzeptanz!**

- BIPV ist ein Muss
- Der Klimawandel wird erheblich mehr geschützten Anbau in der Landwirtschaft erfordern

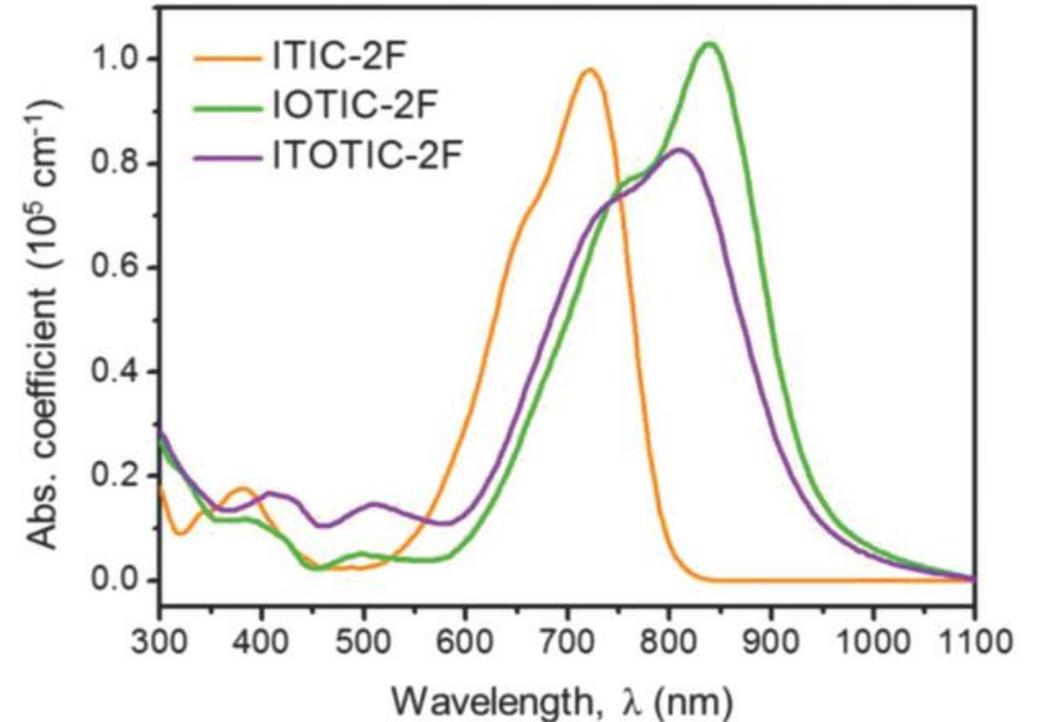
Transparente Photovoltaik

- Attraktiv im Gebäudebereich
- Nützlich in der Landwirtschaft (geschützter Anbau, Anpassung Klimawandel)
- Sehr wahrscheinlich förderlich für Akzeptanz (Ziel 50 – 75 TW_p)

Transparente Photovoltaik



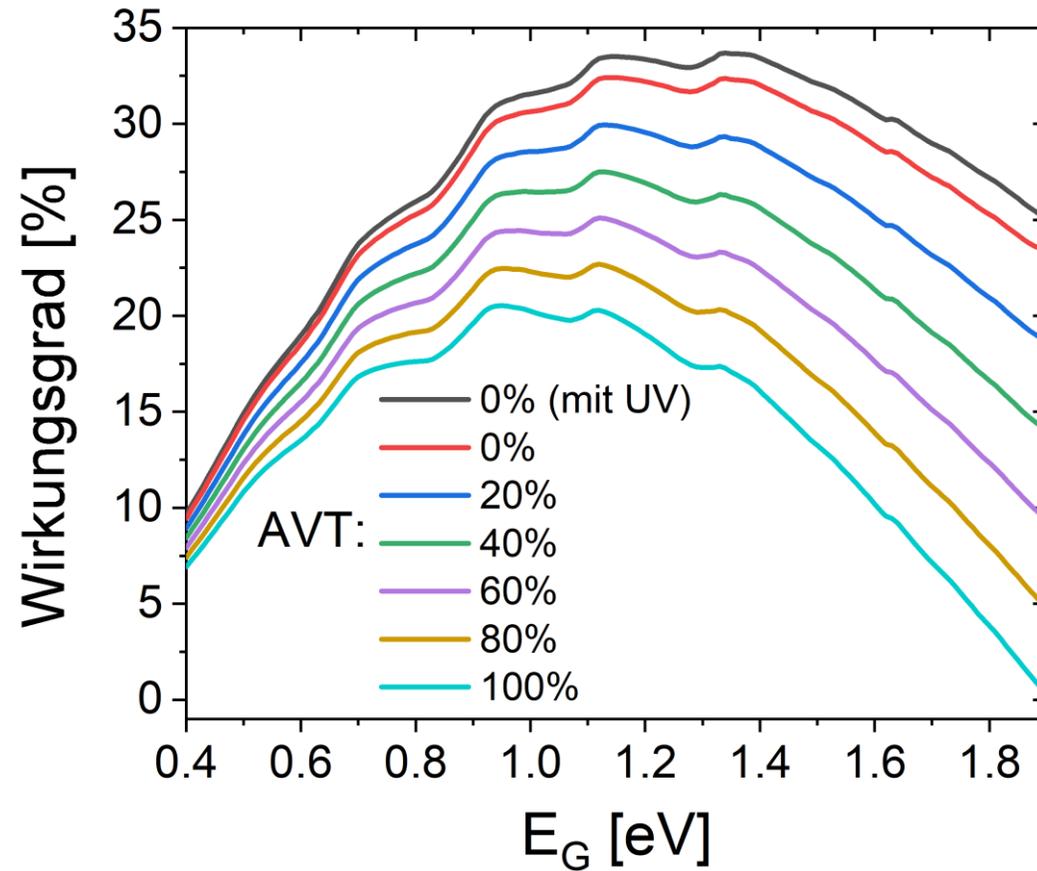
Anorganische kristalline Halbleiter:
Absorptionskoeffizient steigt zu kürzeren
Wellenlängen an



Organische Halbleiter:
Absorption nur in bestimmten spektralen Regionen
→ **spektrale Fenster möglich**

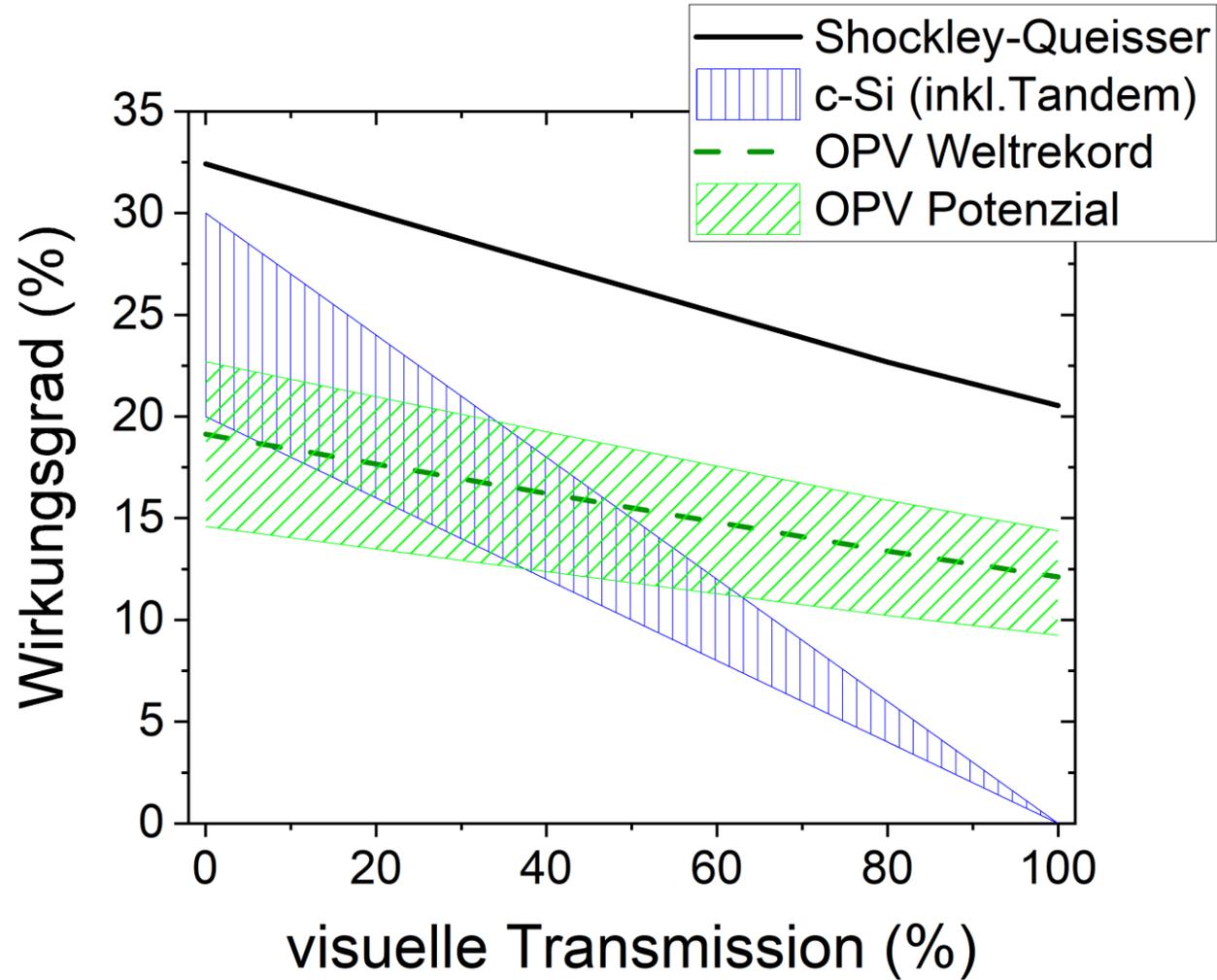
Transparente Photovoltaik

Shockley-Queisser Limit

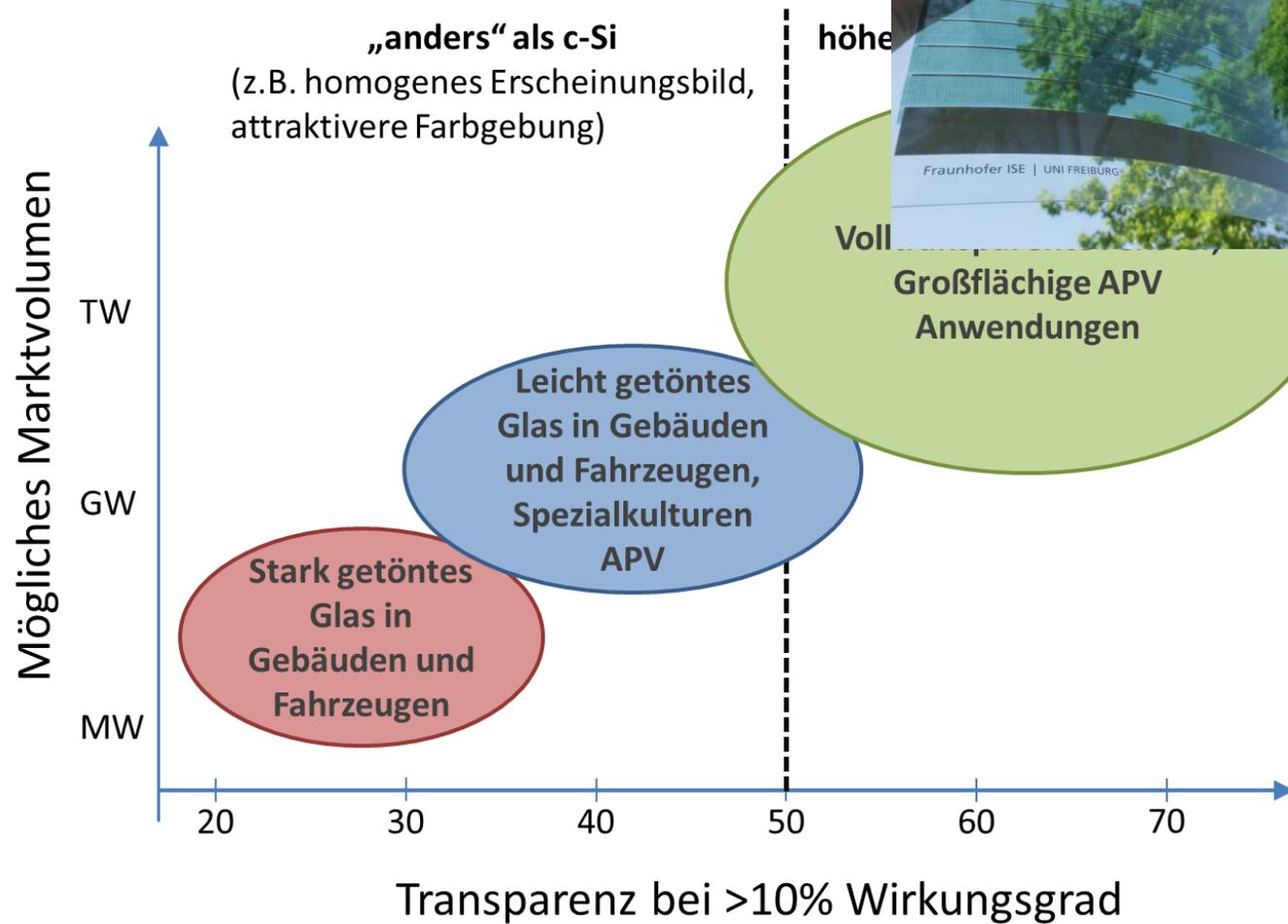


Transparente Photovoltaik

Abschätzung realistisches Potenzial

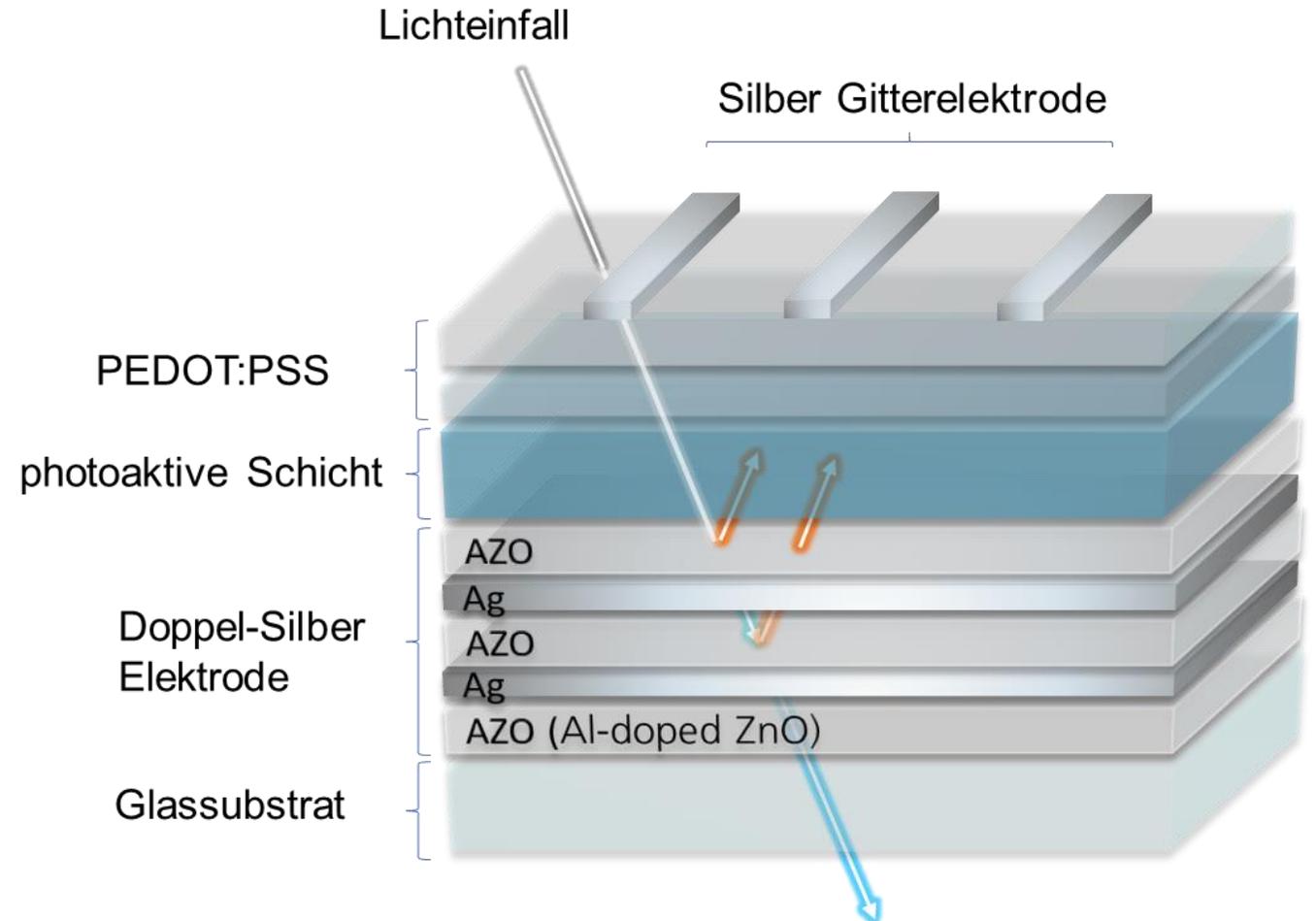
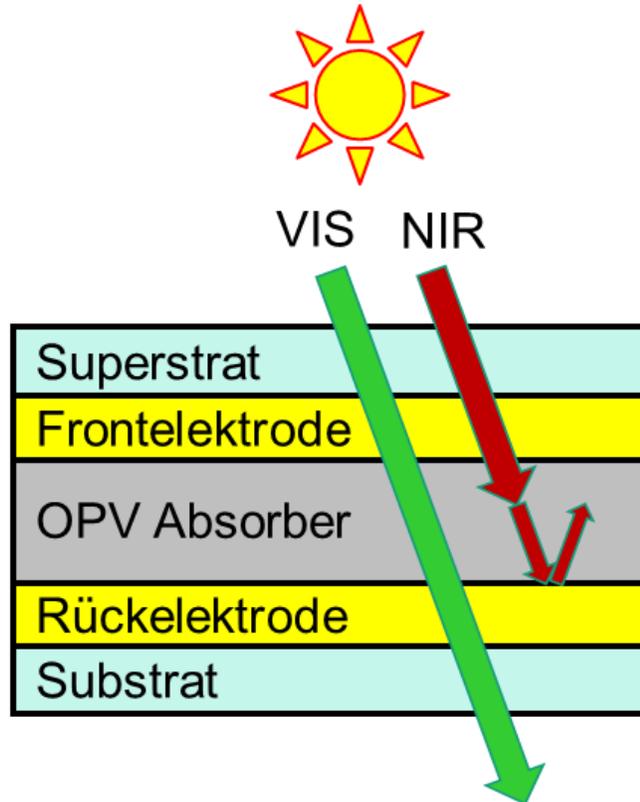


Transparente Photovoltaik



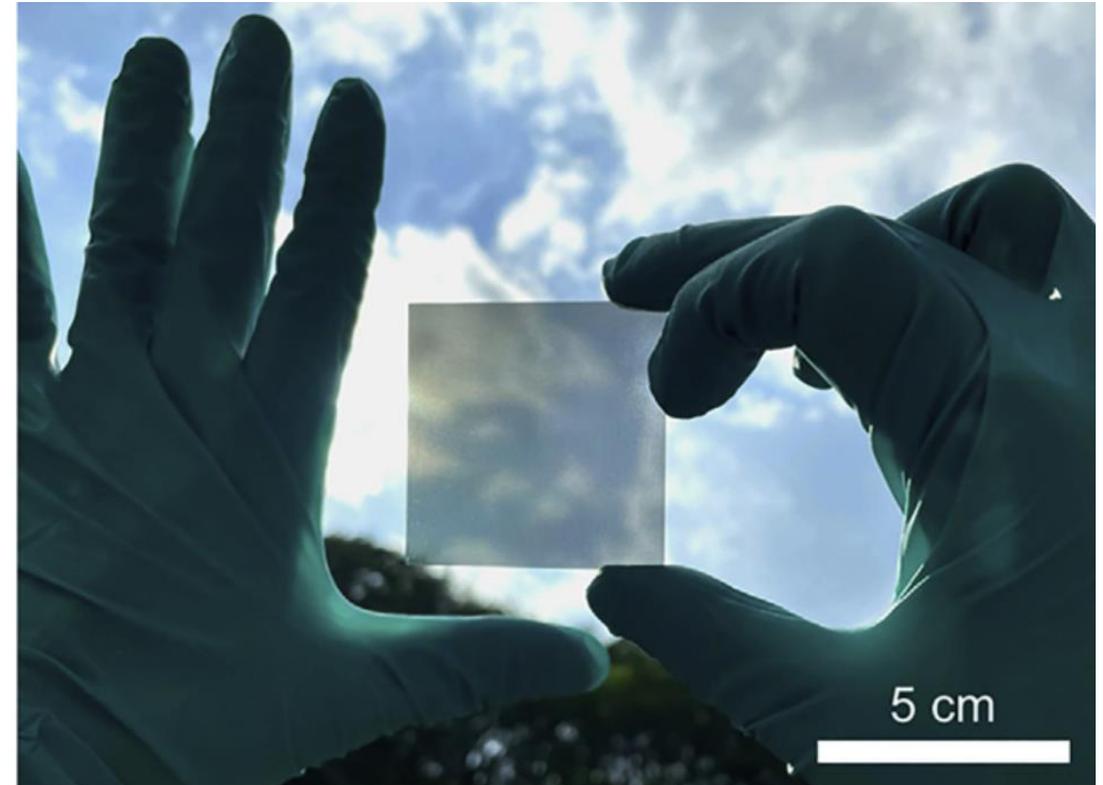
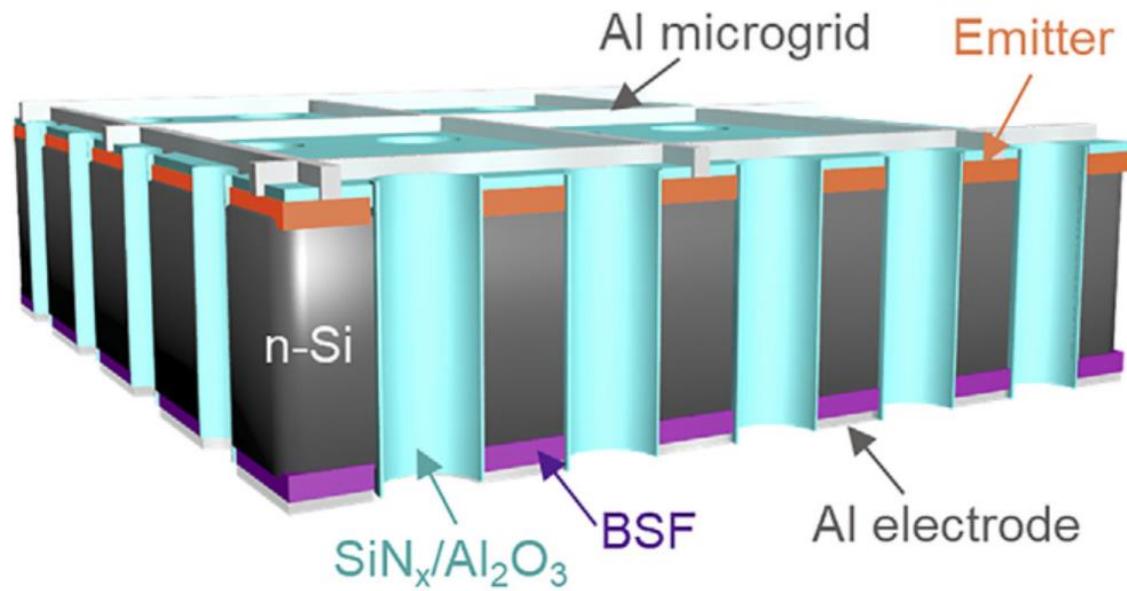
Organische Photovoltaik ist eine vielversprechende Technologie für Anwendungen, bei denen eine hohe visuelle Transparenz gefordert ist
→ großer potenzieller Markt

Anforderungen an Elektrodensysteme



L. Pap, UW et al., *Solar RRL* **2023**, 2300561

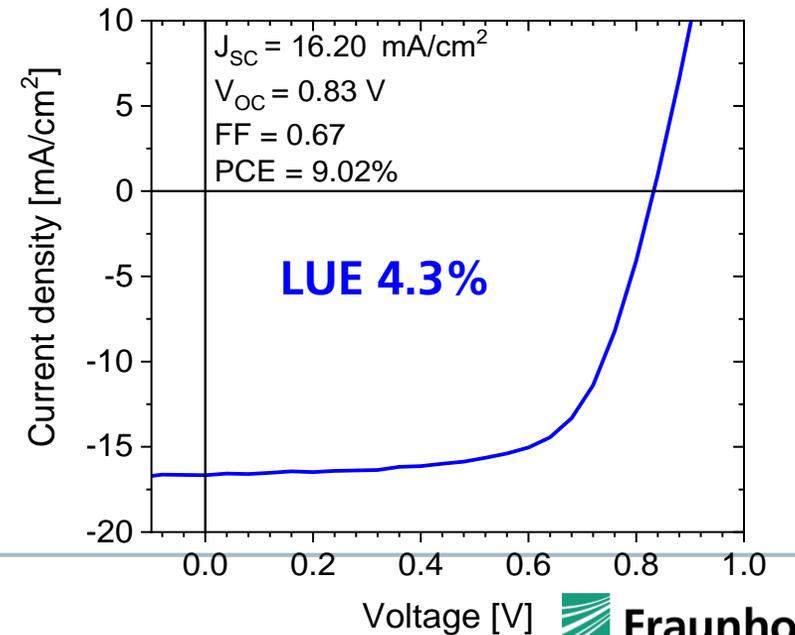
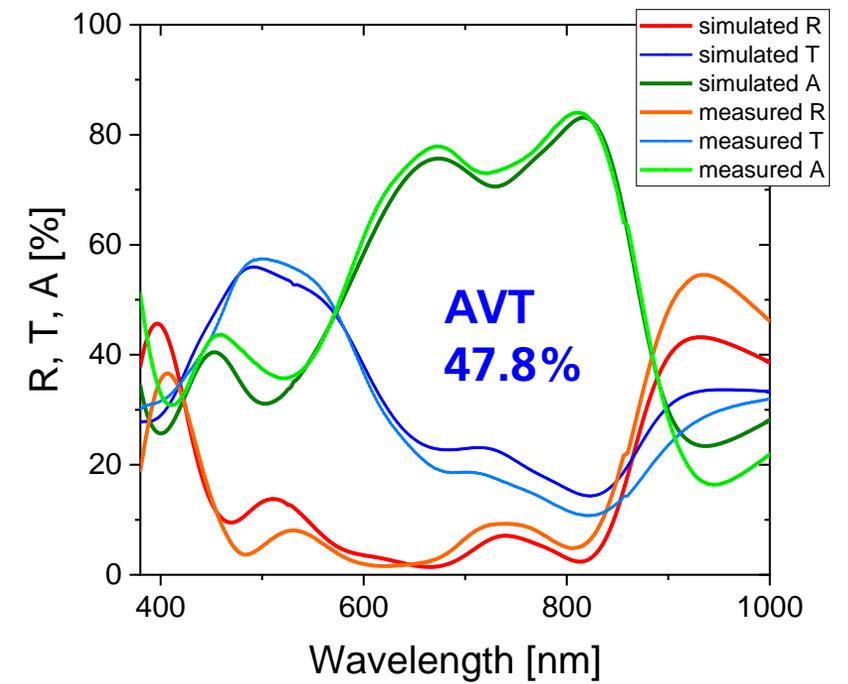
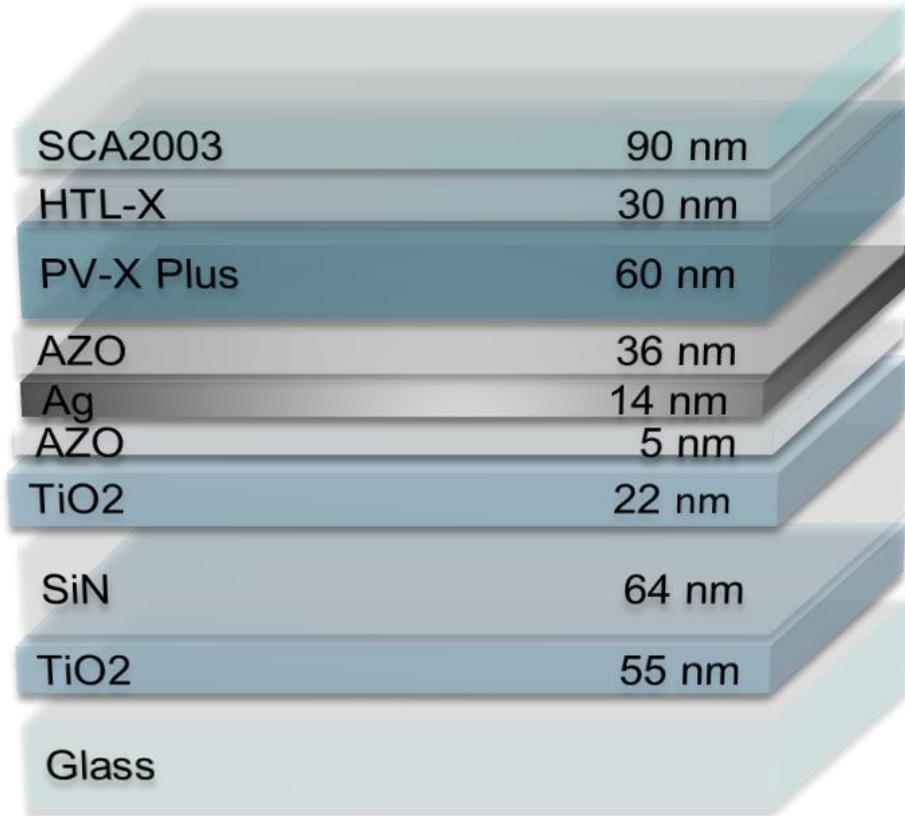
Transparente c-Si PV



Transparente Organische PV

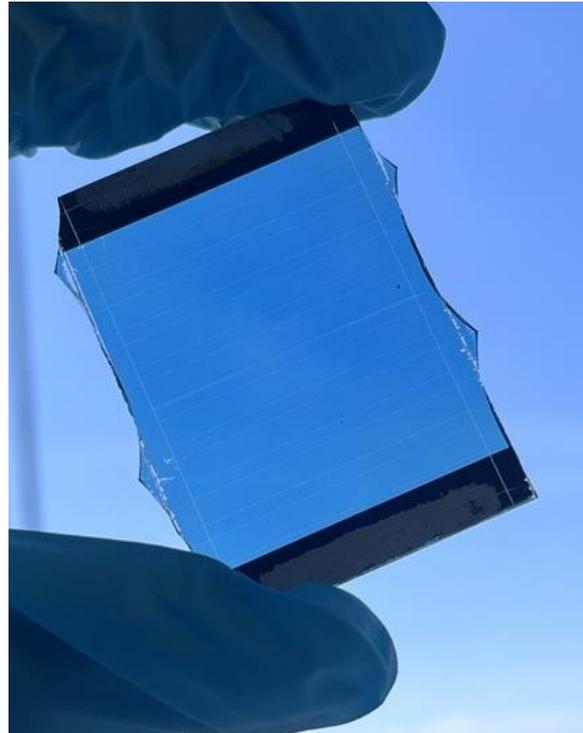


Transparente Organische PV

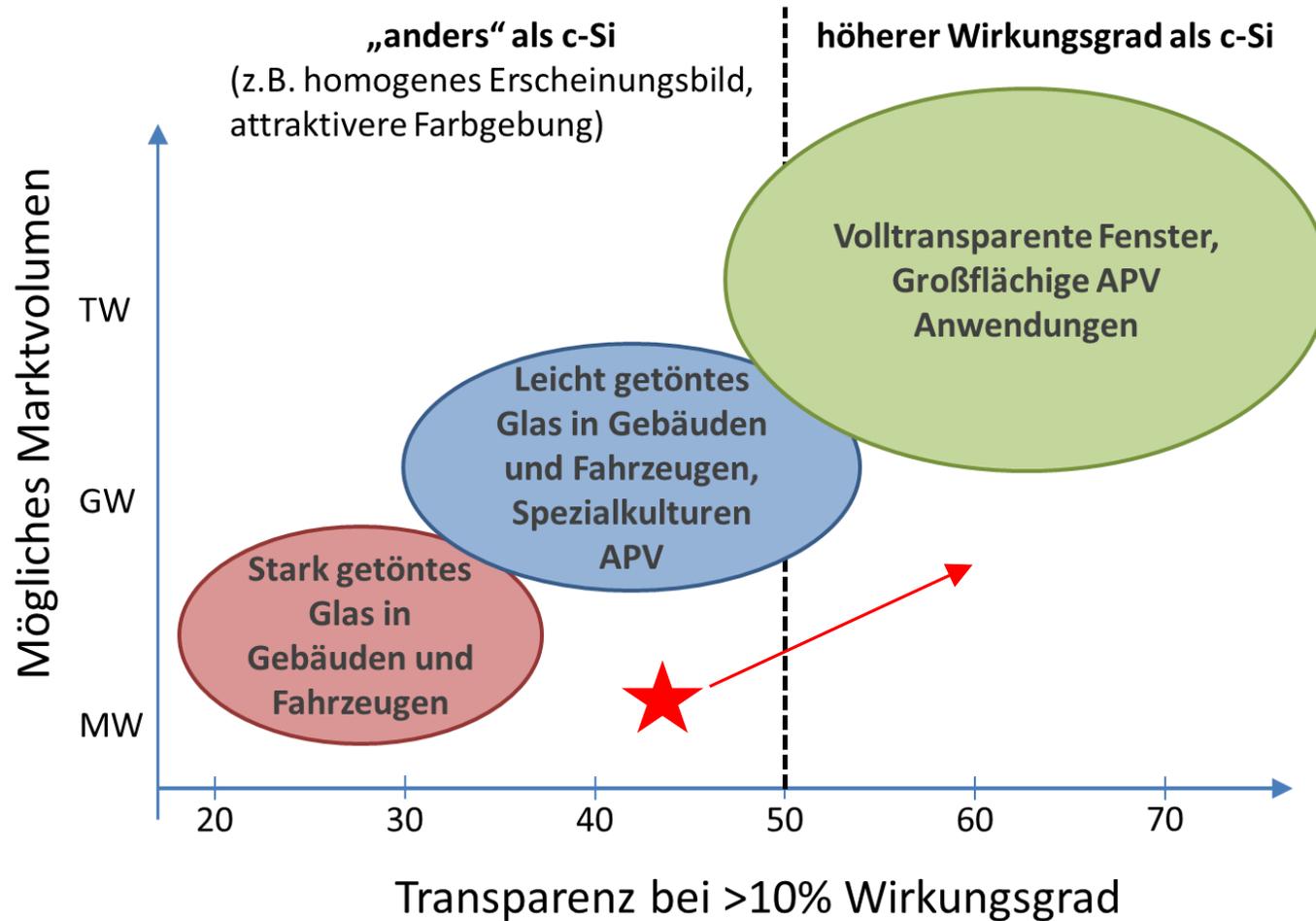


L. Pap, UW et al., *Solar RRL* **2023**, 2300561

Transparentes OPV-Modul

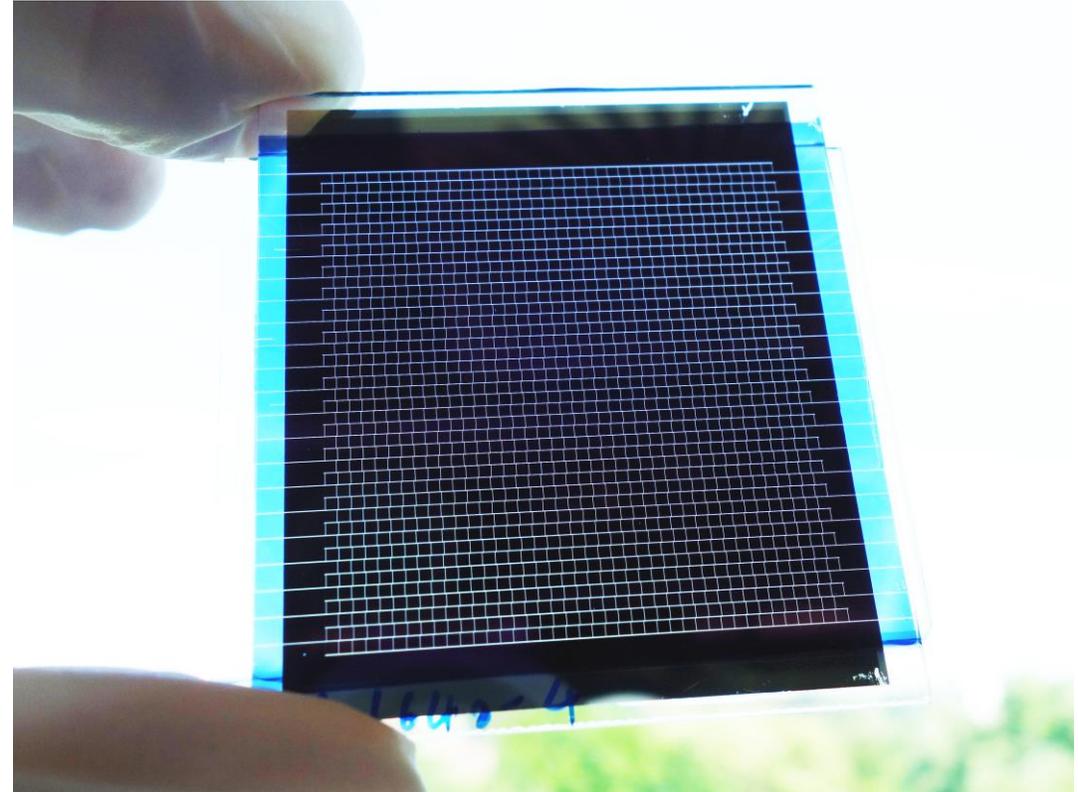


Transparente Organische Photovoltaik



Organisches PV-Modul mit sehr hoher Spannung

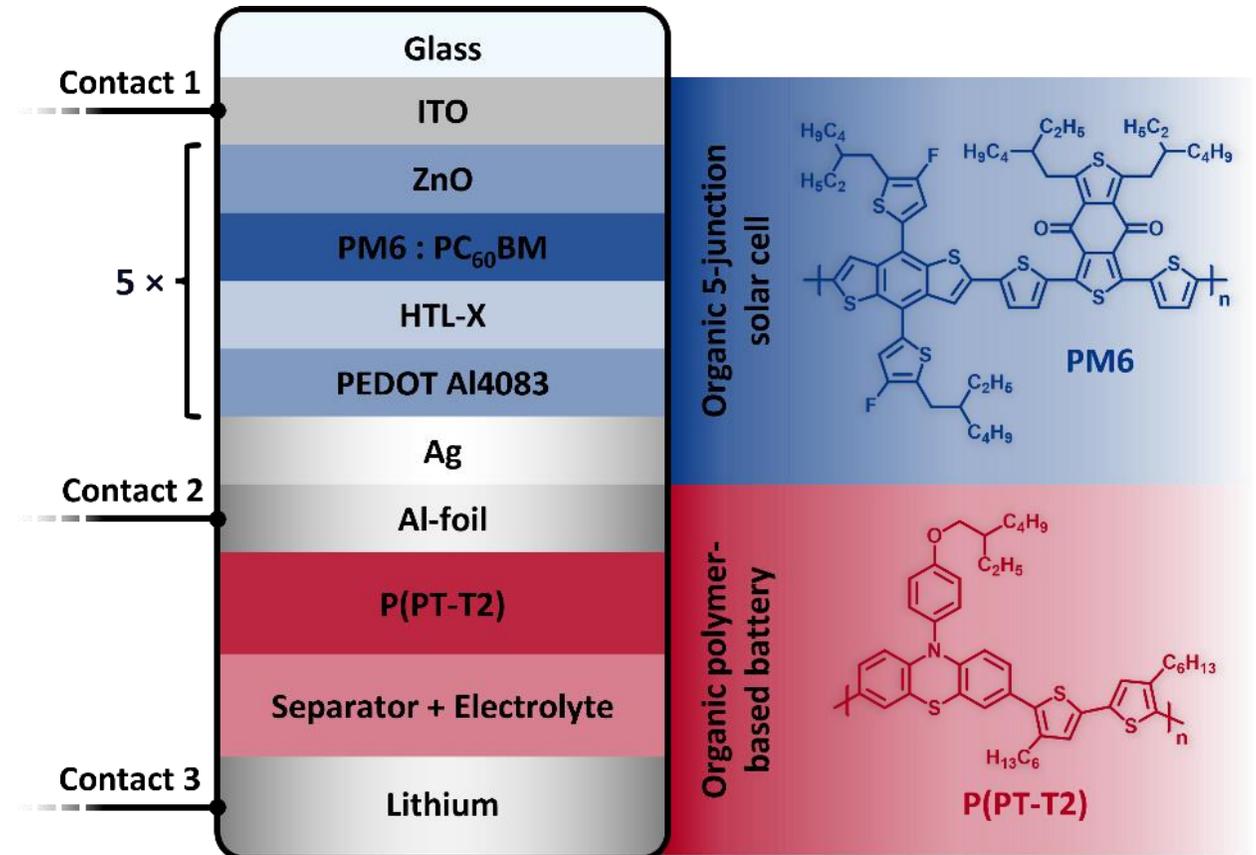
- OPV Hochspannungs-Modul als Energiequelle für dielektrische Elastomer-Mikroaktuatoren
- 1640 serienverschaltete Zellen auf 3.6 cm x 3.6 cm
- Offene Klemmenspannung > 1600 V



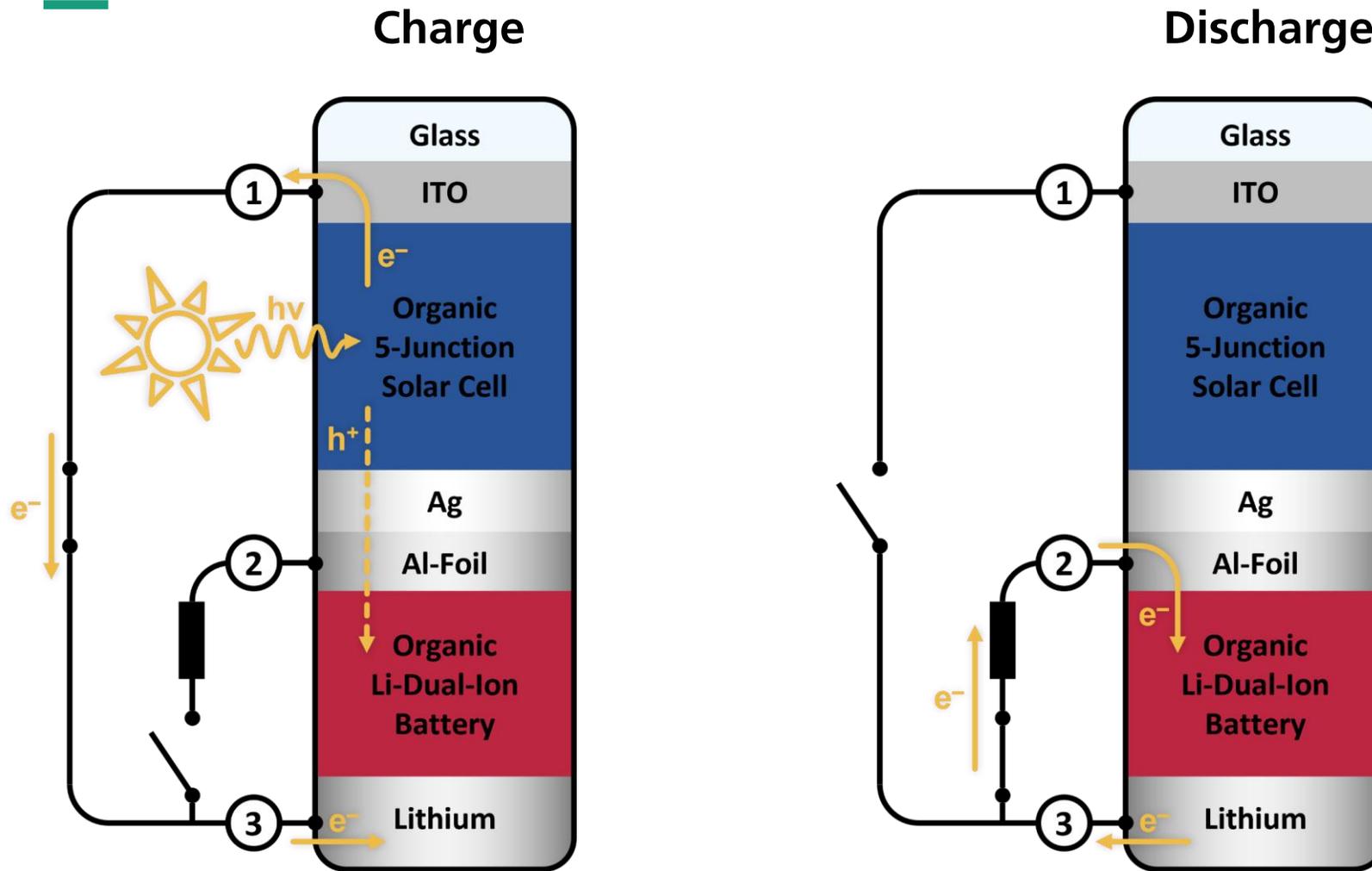
E. Jiang, UW *et al.* *ACS Energy Lett.* **2024**, 9, 908–910

Organische Photovoltaik – Monolithische Integration mit Organischer Batterie

- Organische Quintupel Solarzelle
- Monolithischer Integration durch 3-Elektroden Aufbau mit organischer Li-Ionen Batterie
- Spannung unter 0.1 Sonne ausreichend, um organische Li-Ionen Batterie zu laden



Organische Photovoltaik – Monolithische Integration mit Organischer Batterie



R. Delgado, UW *et al.*, *EES* 2023, online

Detection of Luminescence in Solar Cells

...is a very useful characterization technique

- Quantitative
- Non-destructive
- Fast (e.g. c-Si wafer within ~1 s)
- High-resolution
- Non-contact (for PL)

- ...and, most important

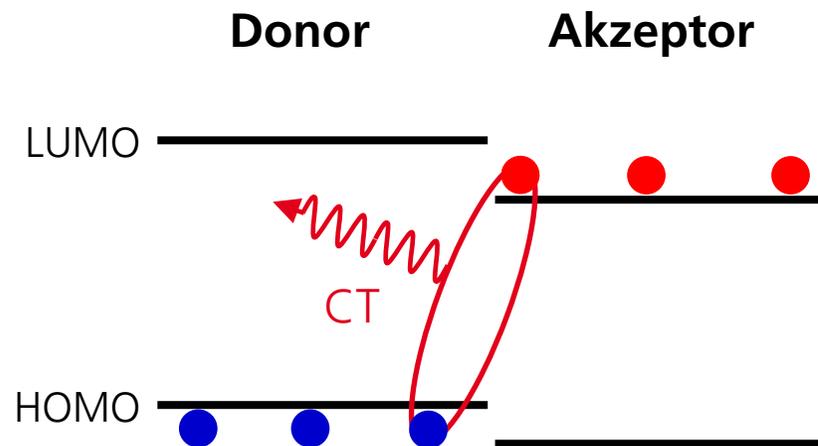
$$I_{\text{PL/EL}} \propto \int_0^d R_{\text{rad}} dx = \int_0^d k_{\text{rad}} n_e n_h dx = \int_0^d k_{\text{rad}} n_i^2 \exp\left[\frac{\Delta E_F}{k_B T}\right] dx$$

- However, for PL of OPV devices, this cannot be applied...

Elektro- and Photolumineszenz in Organischen Solarzellen

Electrolumineszenz: Injektion von (freien) Ladungsträgern

- CT Rekombination



Photolumineszenz: Generation von Exzitonen

- Rekombination von Exzitonen
- CT Rekombination

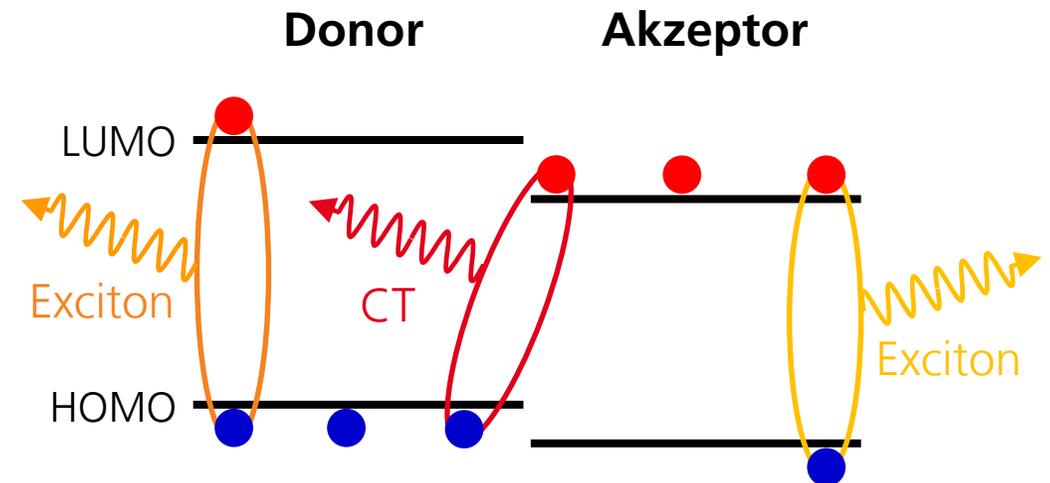


Photo- und Elektrolumineszenz in Organischen Solarzellen

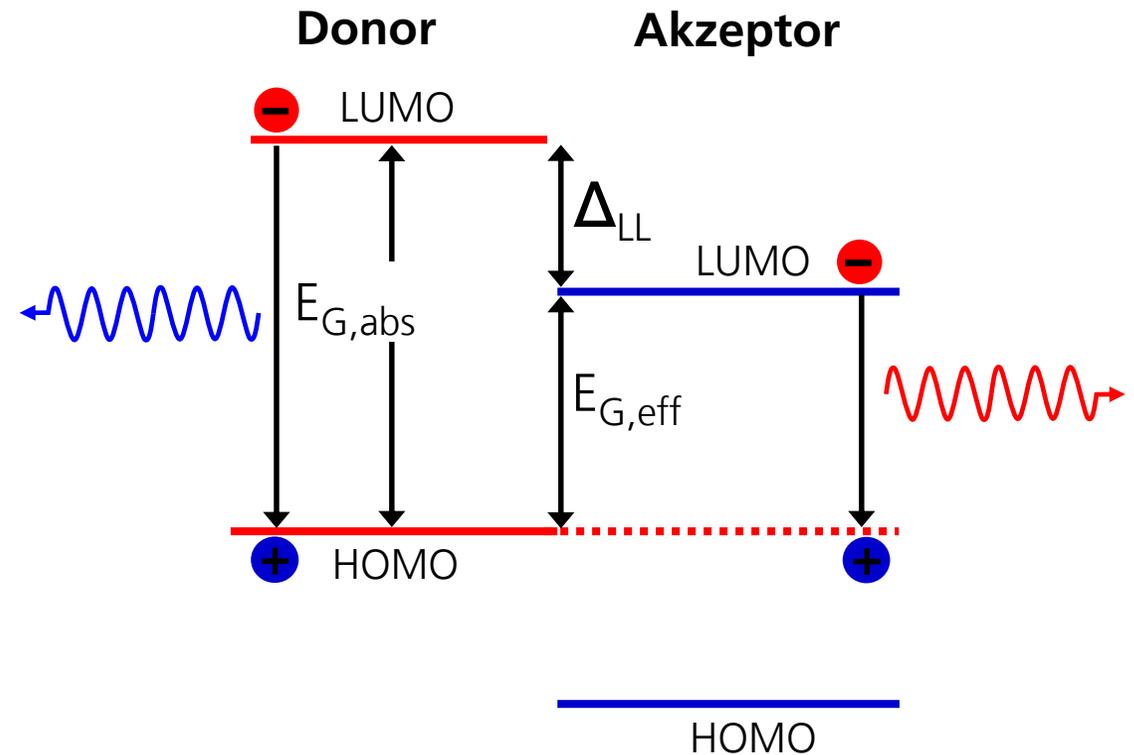
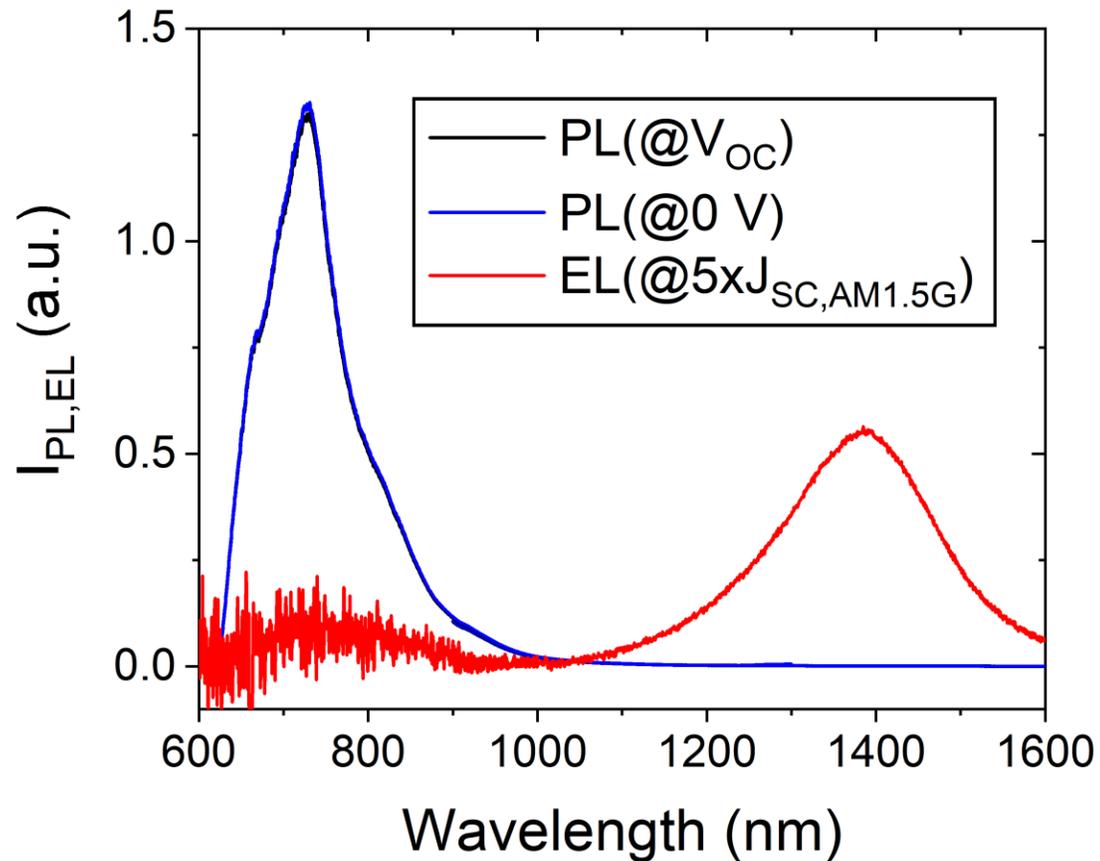
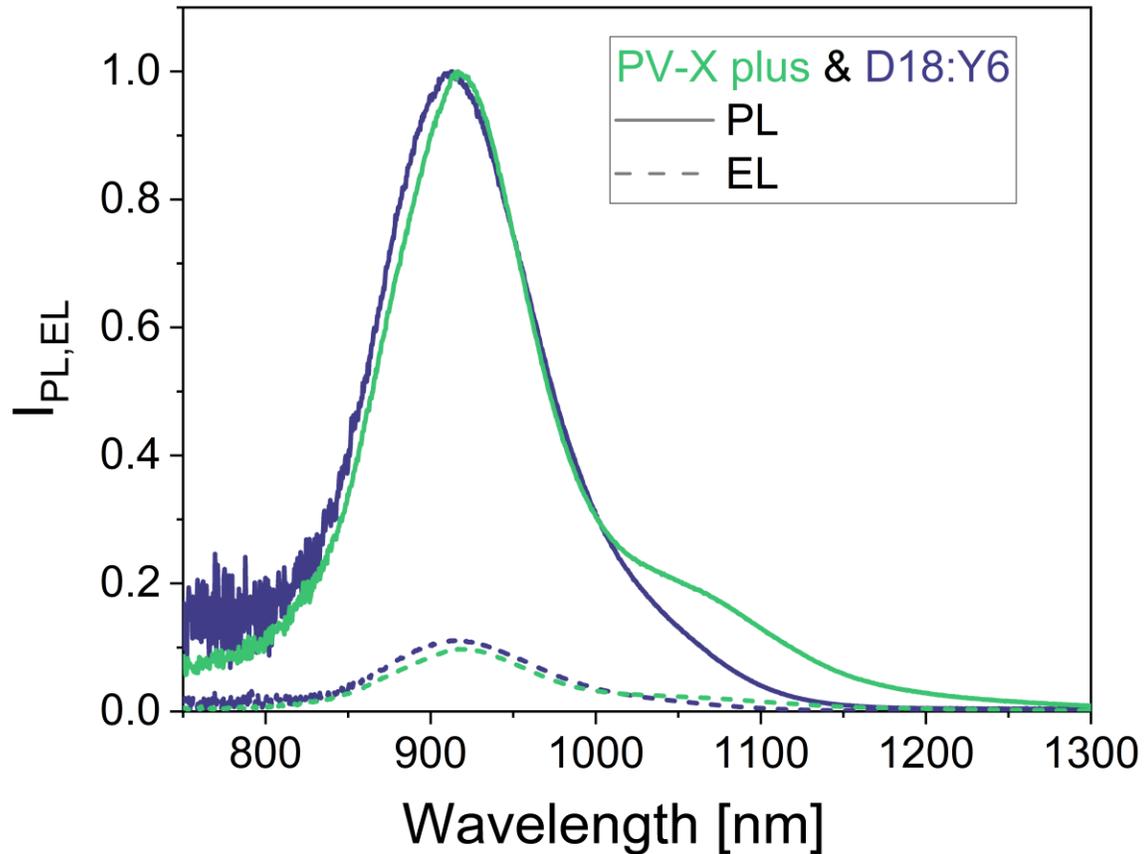
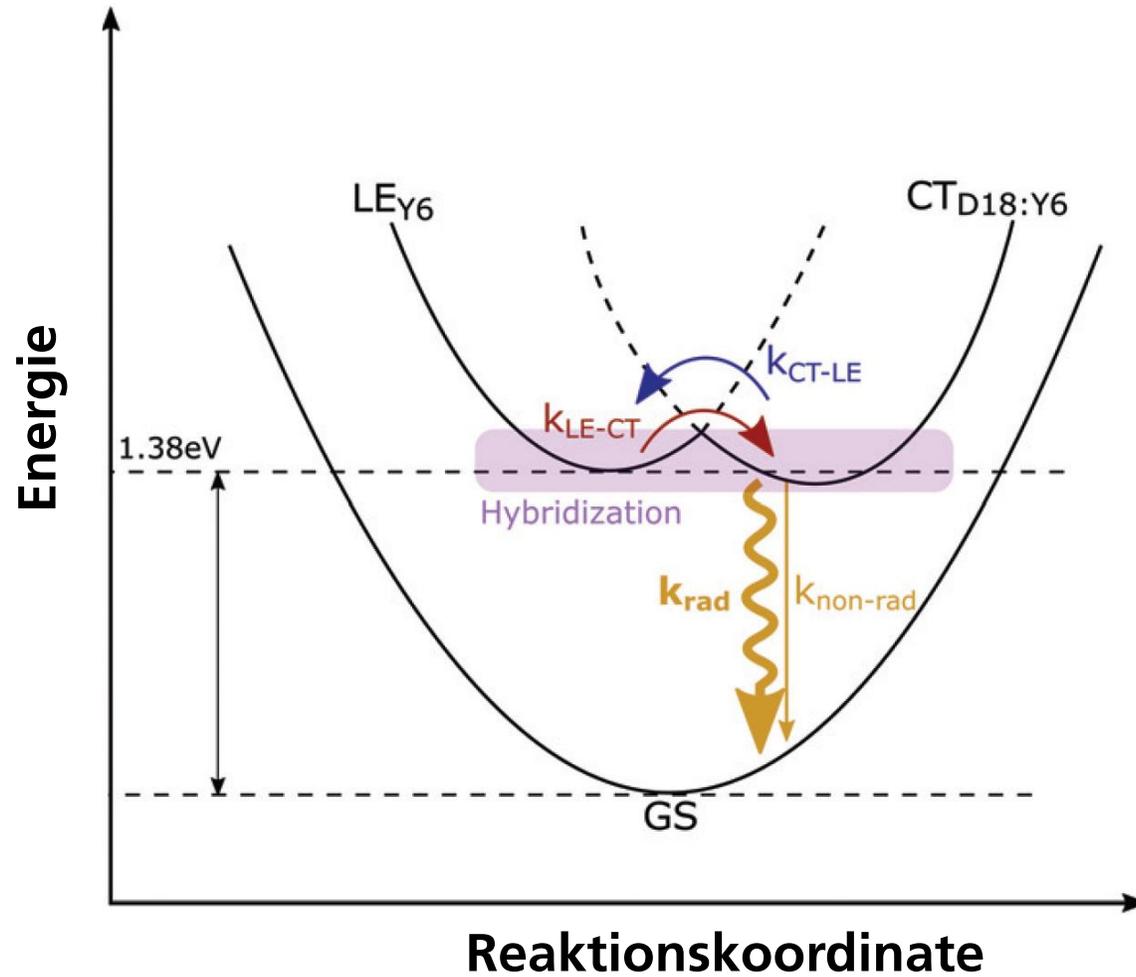


Photo- und Elektrolumineszenz in Organischen Solarzellen



- PL & EL spektral nicht zu unterscheiden
- EL wesentlich schwächer bei gleichen Rekombinationsströmen

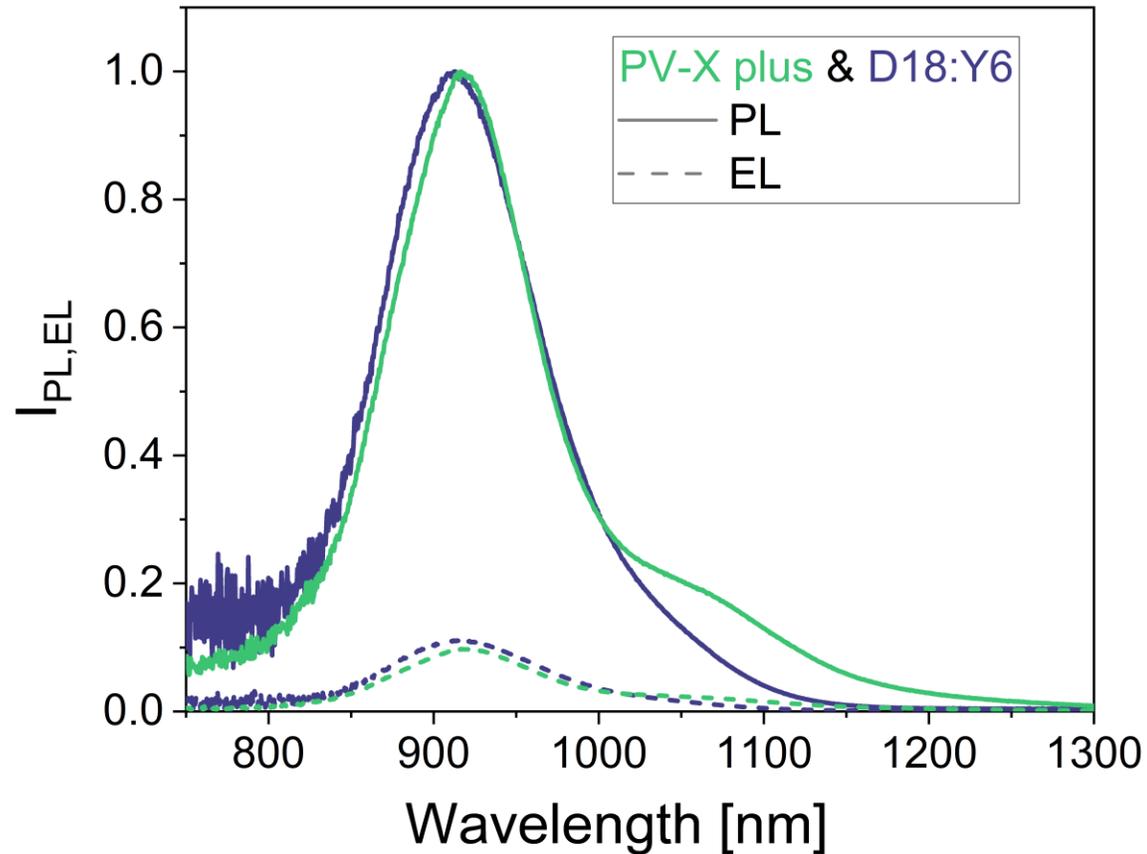
Hybridisierung durch Kopplung



- PL & EL sind beide dominiert durch Emission aus LE-Zuständen im Akzeptor

Hofinger et al., *Mater. Adv.* **2021**, 2, 4291

Photo- und Elektrolumineszenz in Organischen Solarzellen



- PL & EL spektral nicht zu unterscheiden
- EL wesentlich schwächer bei gleichen Rekombinationsströmen
- → PL ist stark dominiert durch photogenerierte LE
- Keine direkte Korrelation zwischen PL-Signal and $n_{e,h}$

$$k_B T \ln I_{PL} \propto \Delta E_F$$

Faisst, UW et al. *Adv. Opt. Mater.* **2023**, 2300895

Photo- and Elektrolumineszenz in Organischen Solarzellen

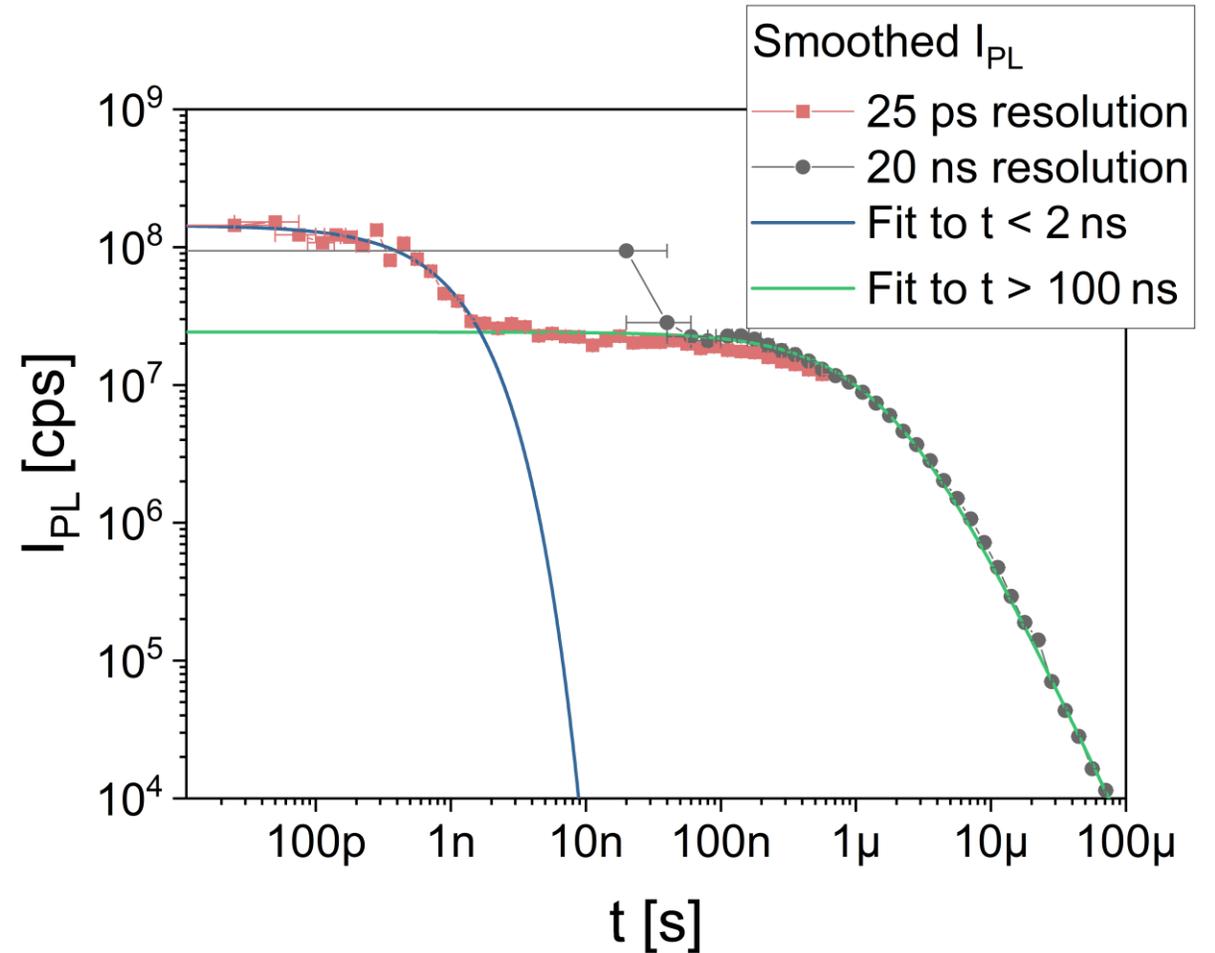
How to disentangle the two contributions to the PL signal?

- Photogenerated LE: $\tau_{LE} \leq ns$
- Free charge carriers: $\tau_{free} \approx \mu s\text{-range}$
- → use transient PL measurements

Transiente Photolumineszenz in Organischen Solarzellen

$$R_{\text{rad}}(t) = k_{\text{rad,LE}} n_{\text{LE}}(t) + k_{\text{rad,free}} n_{\text{free}}^2(t)$$

→ for $t \gg \tau_{\text{LE}} : R_{\text{rad}}(t) \approx k_{\text{rad,free}} n_{\text{free}}^2(t)$



Faisst, UW et al. *Adv. Opt. Mater.* **2023**, 2300895

Conclusion

- Organische Photovoltaik (OPV) kann (noch) nicht mit c-Si konkurrieren
- Die OPV bietet jedoch vielversprechendes Potenzial für gewisse Anwendungen auf Grund spezifischer Materialeigenschaften (Bandlücke, Absorption)
- Als Anwendungsfelder ergeben sich somit hauptsächlich Energieversorgung von IoT Geräten in Innenräumen und solche, bei denen eine hohe visuelle Transparenz gefordert ist
- Lumineszenzmessungen an organischen Solarzellen sind komplizierter als an anderen Solarzellen
- Der Großteil der Photolumineszenz stammt von photogenerierten Exzitonen, dieser Anteil sagt jedoch nichts über den Betriebszustand der Solarzelle aus.
- Zusätzliche Erschwernis ist die Tatsache, dass photogenerierten Exzitonen und freie Ladungsträger schlussendlich über dieselben Zustände emittieren.
- Mittels zeitabhängiger PL-Messungen lassen sich die Signale voneinander trennen

Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!

Uli Würfel
KIT, 23. Februar 2024
uli.wuerfel@ise.fraunhofer.de