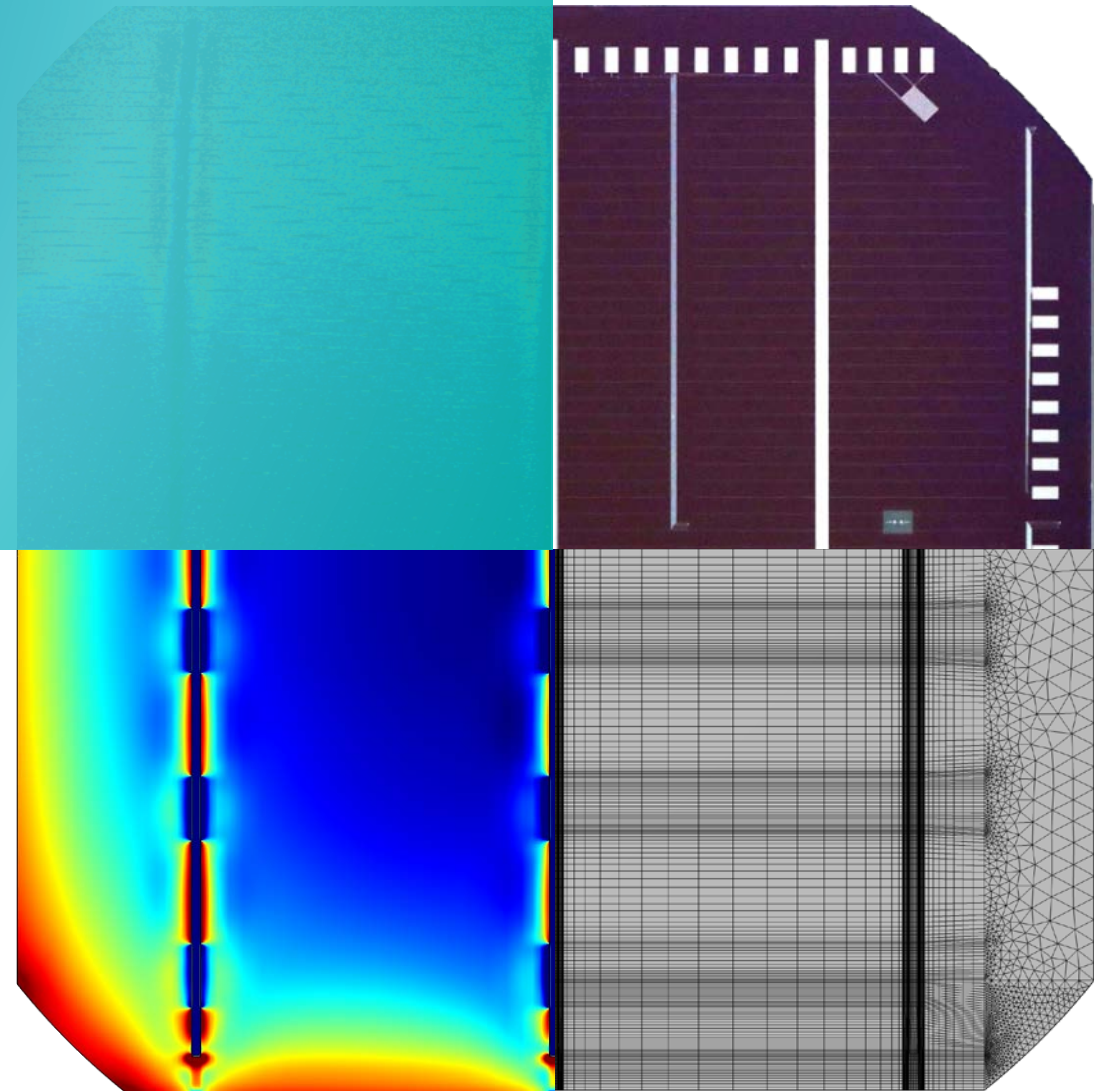


Thermomechanische Modellierung von Photovoltaikmodulen

Andreas Beinert, Pascal Romer, Nils Klasen

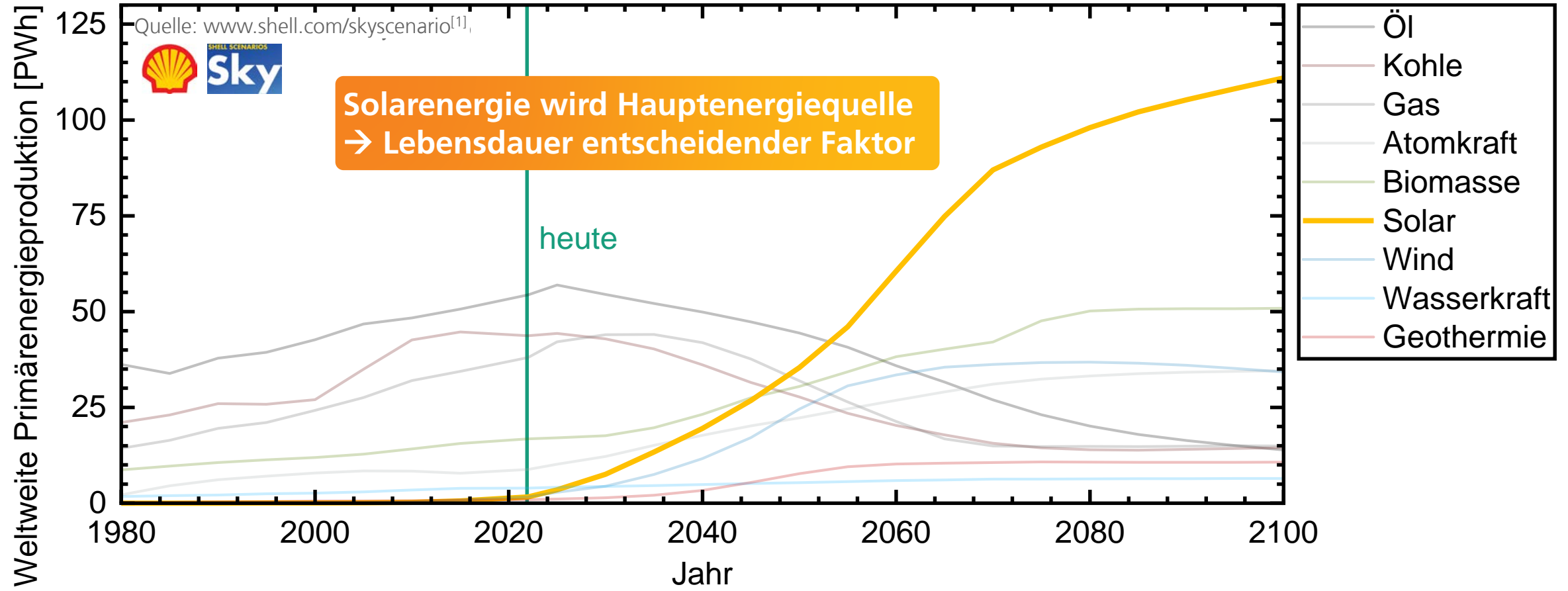
30. November 2022
SimLe 2022, Online

www.ise.fraunhofer.de/FEM



Steigender Energiebedarf

Einhaltung des Paris Abkommens^[1] durch drastische Energiewende



Thermomechanische Belastungen von PV Modulen



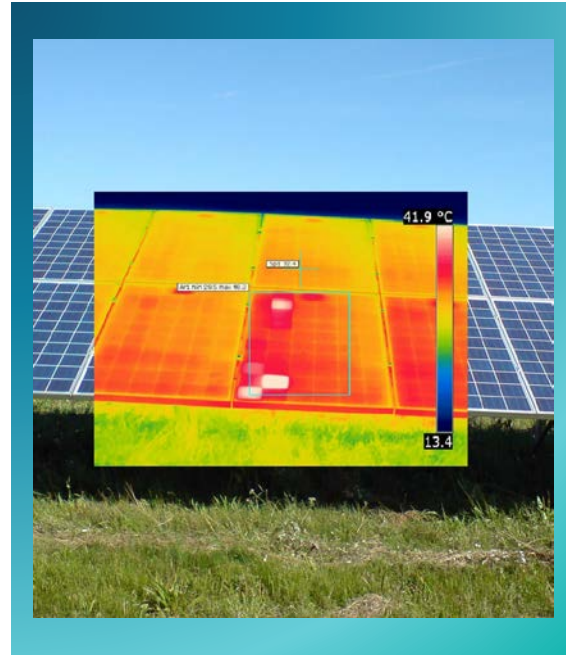
Schnee und Eis

- Bis zu 5400 Pa



Wind

- Bis zu 2400 Pa
- Dynamische Belastung



Temperaturunterschiede

- Winter-Somer
- Tag-Nacht



Sonstiges

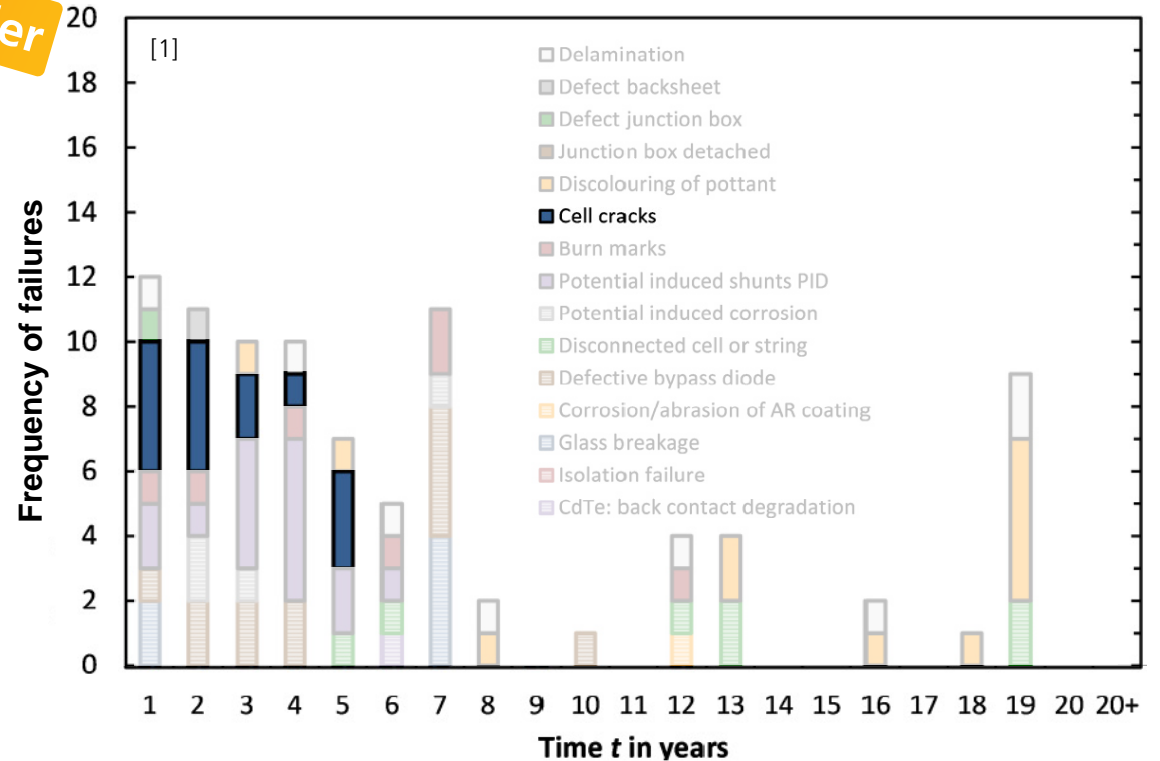
- Hagel
- Transport
- Installation

Motivation

Designfehler

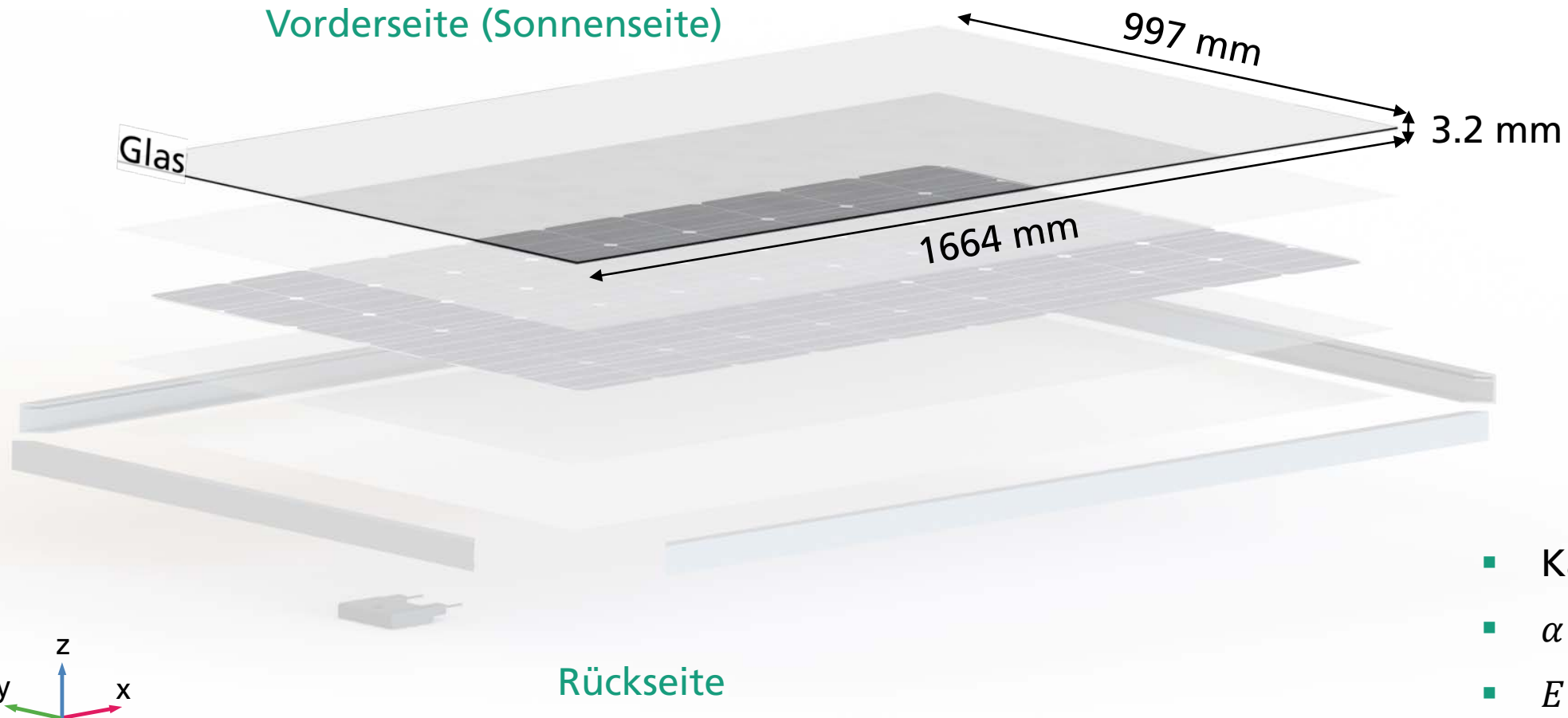
- ▶ Zellrisse eine der Hauptursachen für frühzeitiges Versagen
- ▶ Verursachen weitere Fehlermechanismen
- ▶ Jährlicher Leistungsverlust $\leq 8\ %/a$
- ▶ Zunehmende Materialvielfalt und Komplexität des Moduldesigns

- ▶ **Zeitaufwendige Entwicklung der Materialkombination**
- ▶ **FEM-Simulationen bieten Möglichkeit zur digitalen Produktentwicklung**



Photovoltaisches Modul

Allgemeiner Aufbau | Glas



- Kalk-Natron Glas
- $\alpha = 9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- $E = 74 \text{ GPa}$

Photovoltaisches Modul

Allgemeiner Aufbau | Einkapselung vorne



- Ethylen-Vinylacetat (EVA)
- $\alpha = 270 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- $E = 0.0085 \text{ GPa}$

Photovoltaisches Modul

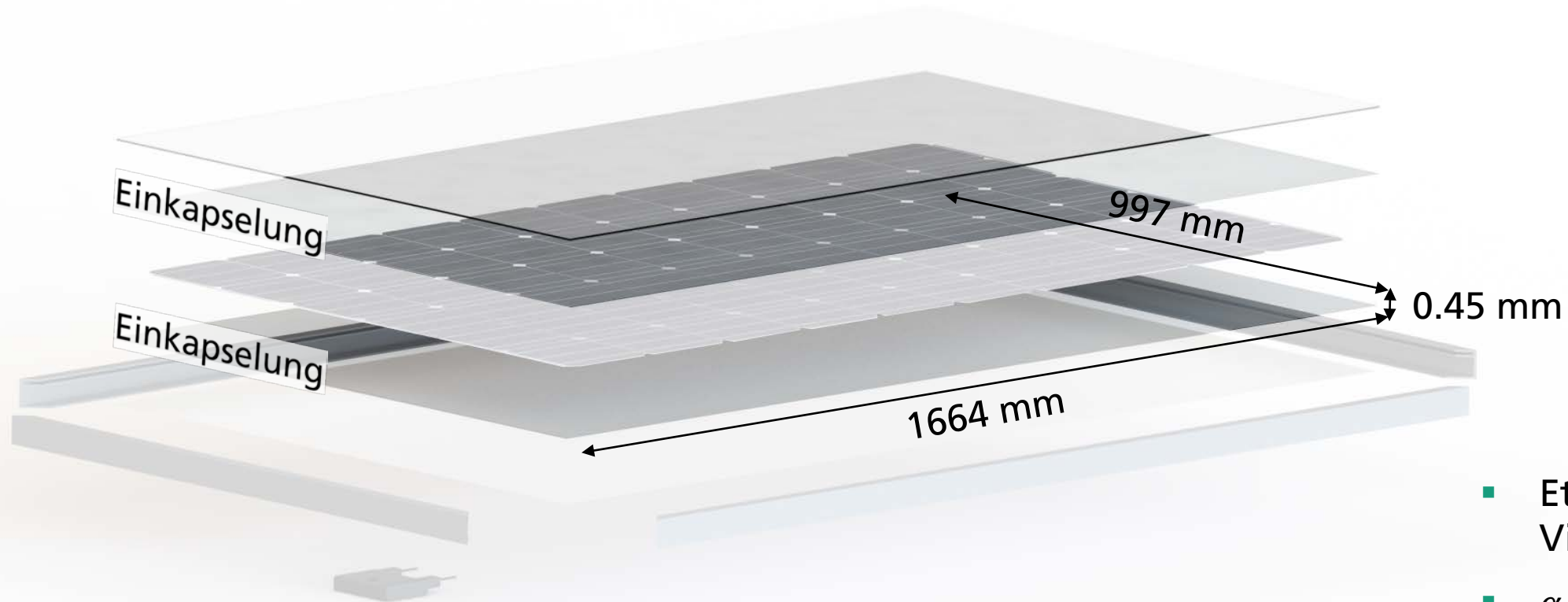
Allgemeiner Aufbau | Solarzellenmatrix



- Silizium
- $\alpha = 2.6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- $E = 130 \text{ GPa}$

Photovoltaisches Modul

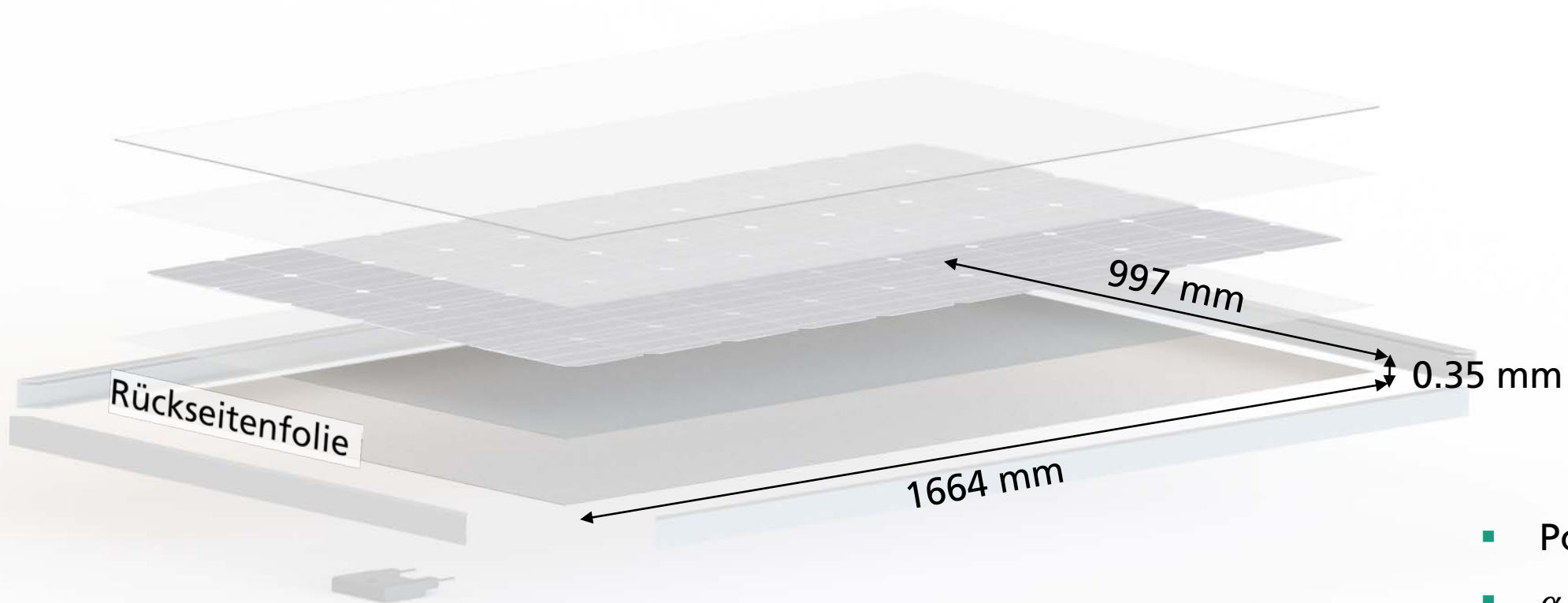
Allgemeiner Aufbau | Einkapselung vorne + hinten



- Ethylen-Vinylacetat (EVA)
- $\alpha = 270 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- $E = 0.0085 \text{ GPa}$

Photovoltaisches Modul

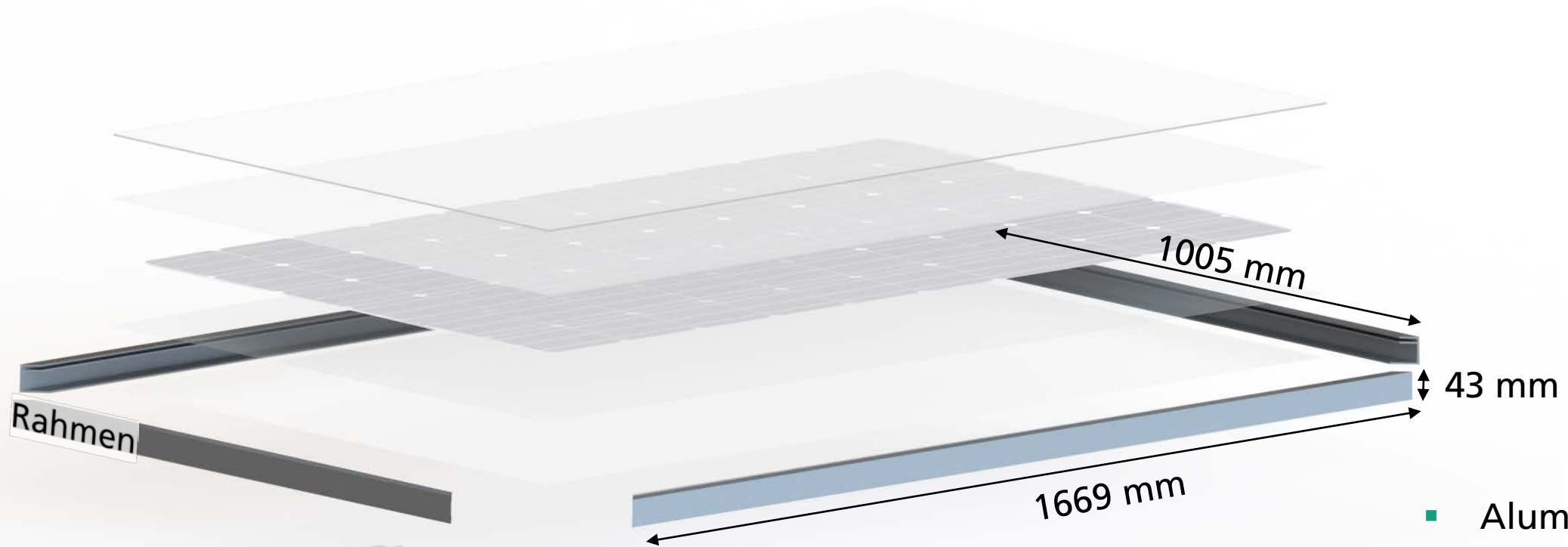
Allgemeiner Aufbau | Rückseitenfolie



- Polyethylen
- $\alpha = 50.4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- $E = 3.5 \text{ GPa}$

Photovoltaisches Modul

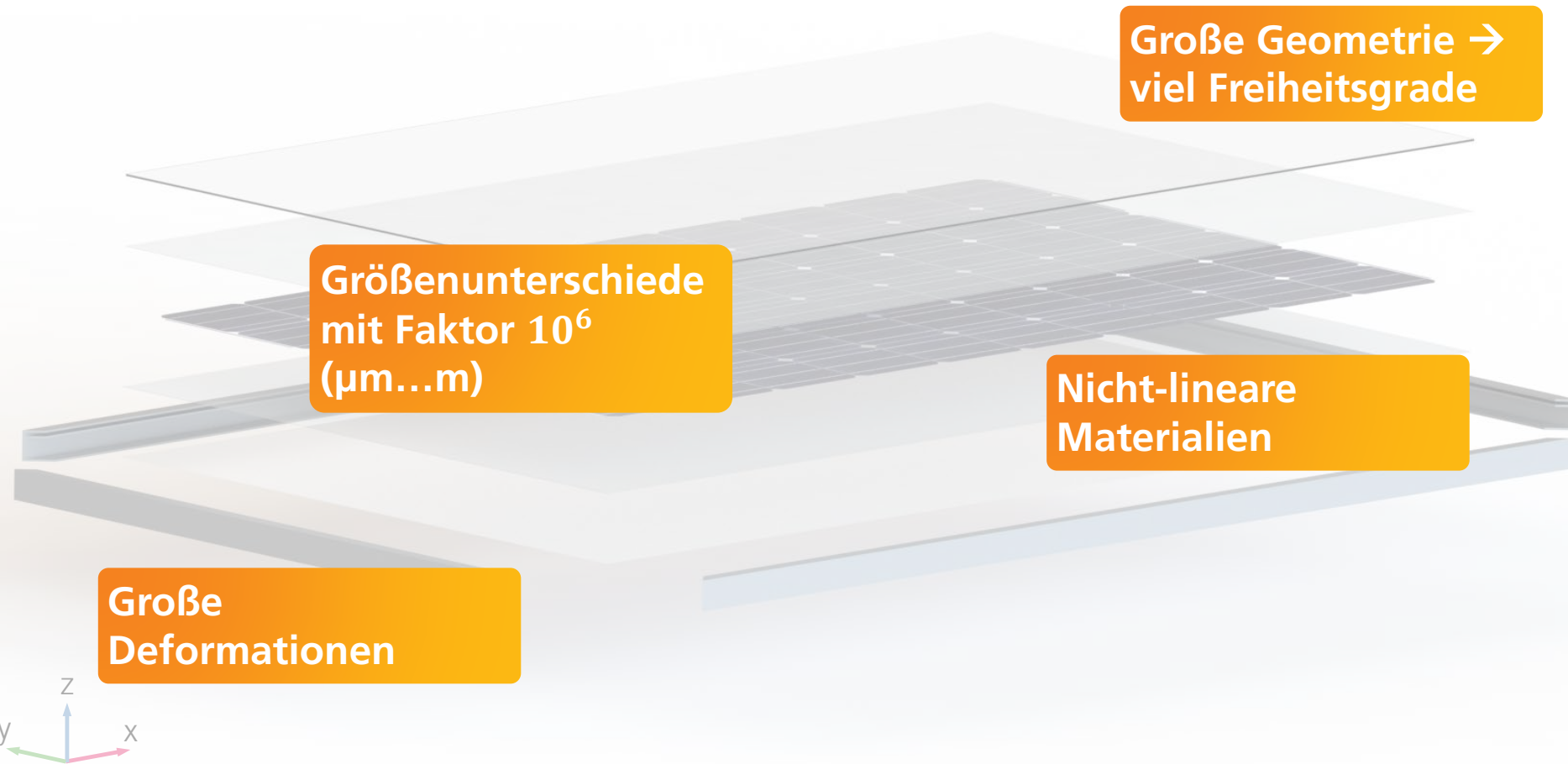
Allgemeiner Aufbau | Rahmen



- Aluminium
- $\alpha = 23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- $E = 70.3 \text{ GPa}$

Photovoltaisches Modul

Simulatorische Herausforderungen

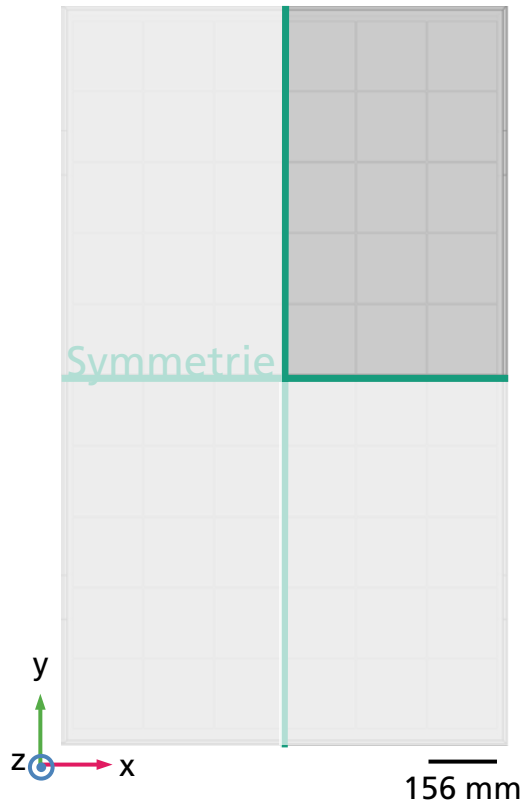


Standard PV Modul

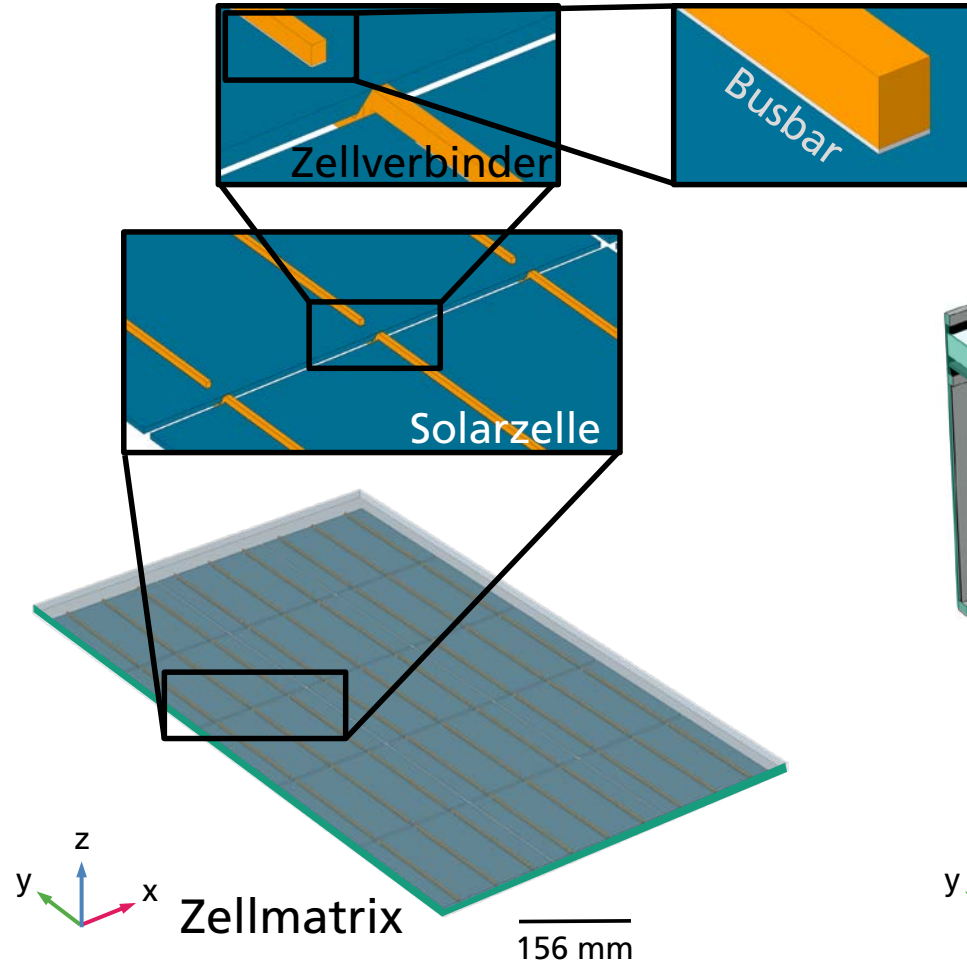
Modellaufbau

(z-Achse $\times 10$ skaliert)

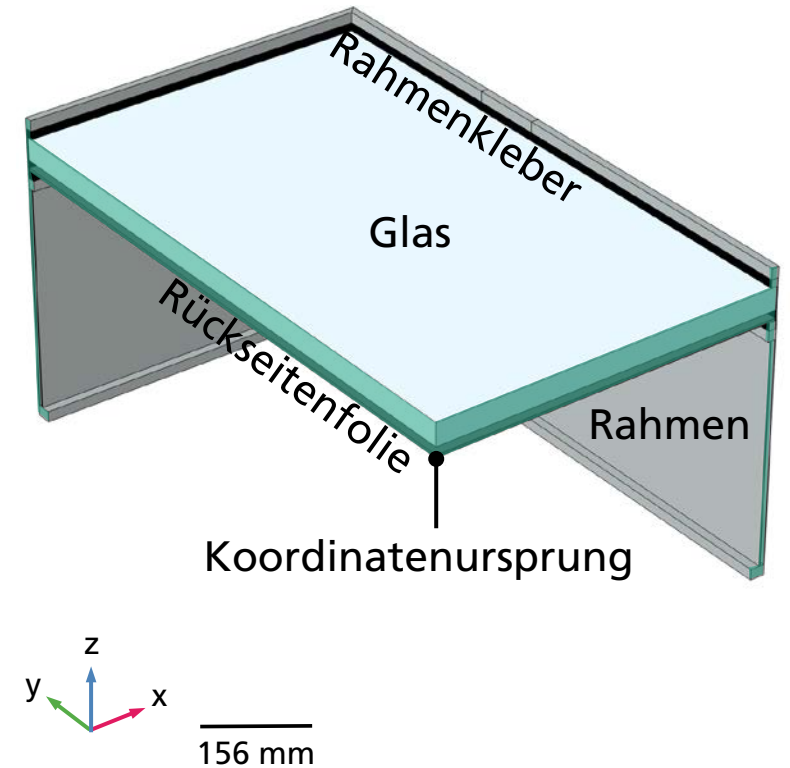
Aufsicht komplette Geometrie



Komponente 1



Komponente 2



Standard PV Modul

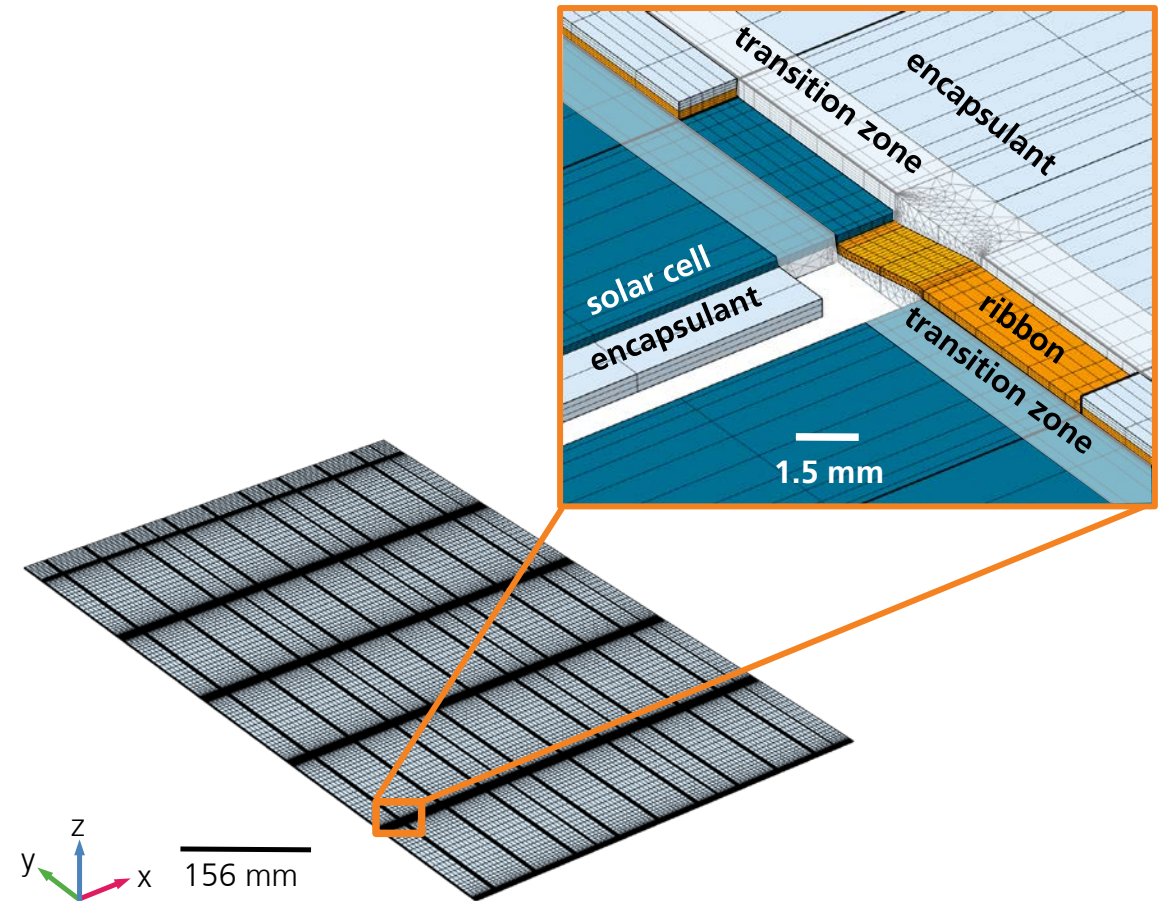
Modellaufbau

Geometrie

- Flexibel aufgebaut
- Abbildung aller gängigen Modul Designs
 - Glas-Folie, Glas-Glas, glasfrei
 - Zellgrößen
 - Geteilte Zellen
 - Schindeln
- Detailgetreue Abbildung Modulrahmen

Simulation von

- Verschaltung
- Lamination
- Mechanischer Last
 - Inklusive Unterkonstruktion
- Thermische Last



Symmetrieelement eines 60-Zellen Moduls
(Glas, Rückseitenfolie und Rahmen ausgeblendet)

Standard PV Modul

Mechanische Last nach IEC 61215

Löten

Abkühlung nach Verschaltung:
179 °C → 150 °C

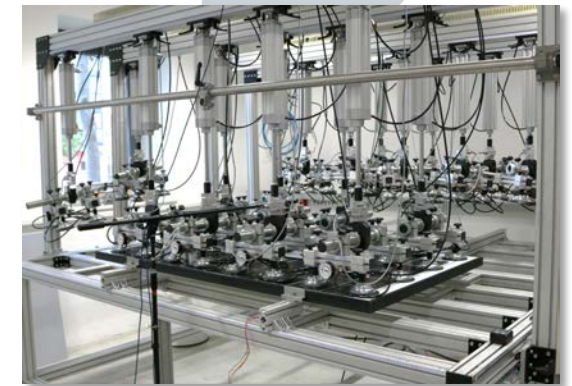
Lamination

Abkühlung nach Lamination:
150 °C → 25 °C

Mechanische Last

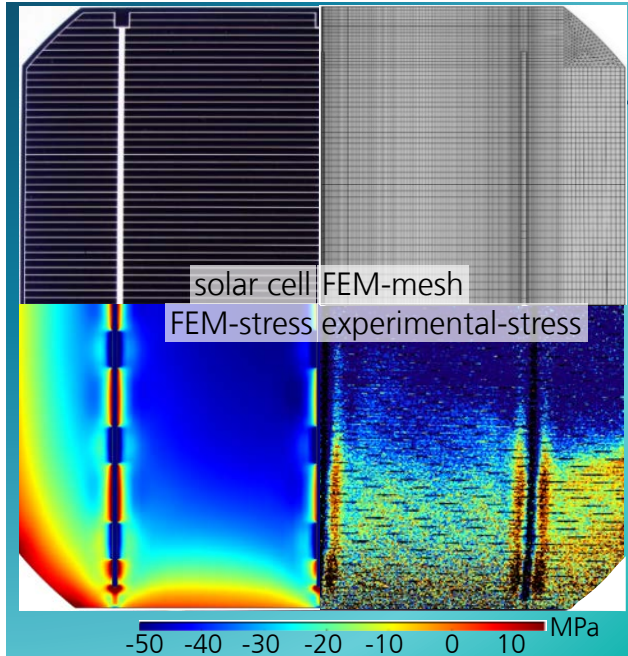
Mechanische Oberflächenlast:
2400 Pa & 5400 Pa
@ +85...-40 °C

Spannungsaufbau durch Weitergabe des Spannungstensors



Standard PV Modul

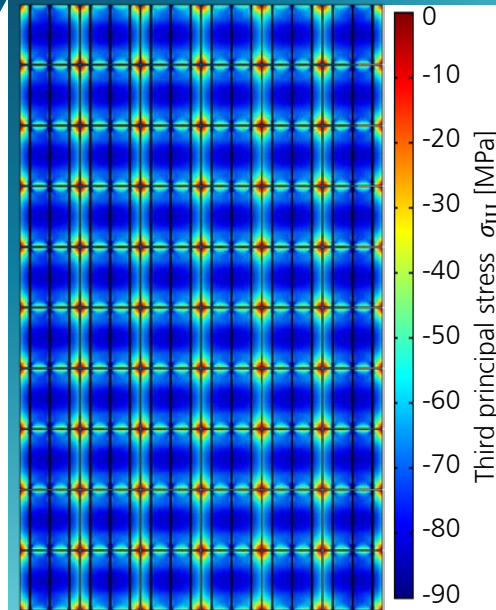
Spannungsüberlagerung



Spannungen in einer Solarzelle nach der Lamination

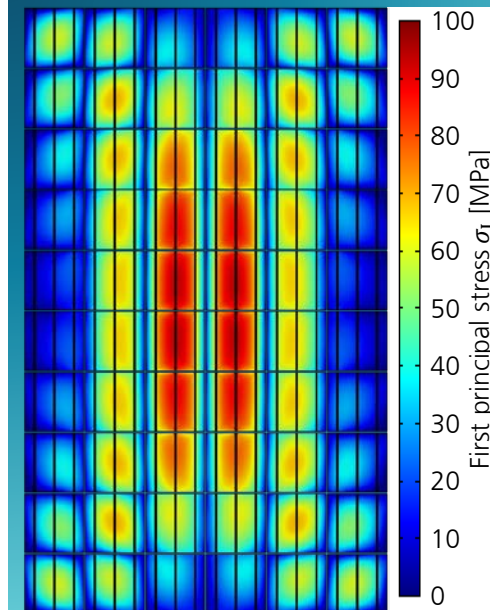
- Druckspannung dominiert
- Hohe lokale Zugspannung am Ende des Zellverbinders

[1]



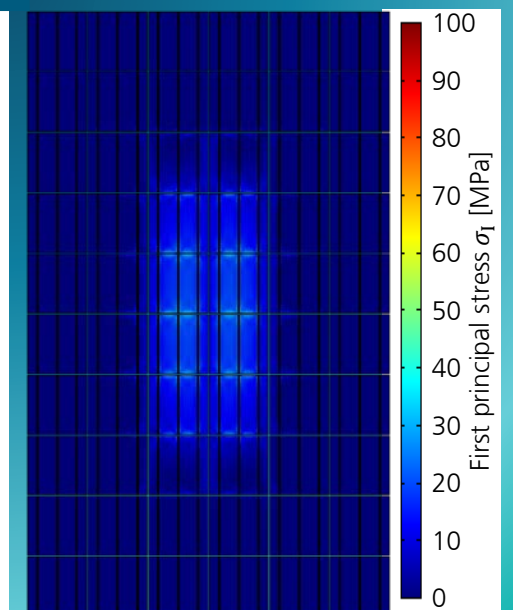
Spannung im PV Modul nach Lamination

- Druckspannung dominiert
- Minimaler Randeffekt



Spannung durch mechanische Last (Ohne Laminationsspannung)

- Zugspannung entlang Moduldiagonale



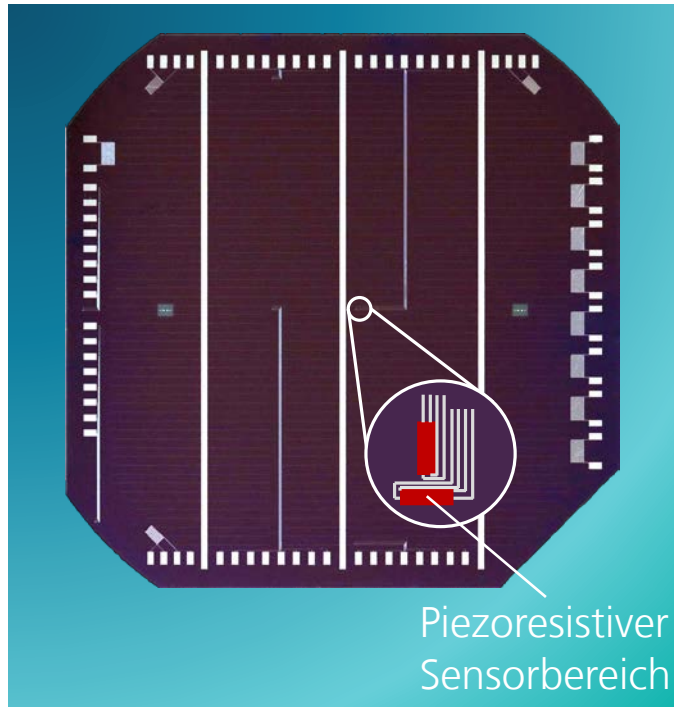
Spannung durch mechanische Last

- Teilweise Kompensation der Zugspannung durch Druckspannung

[2]

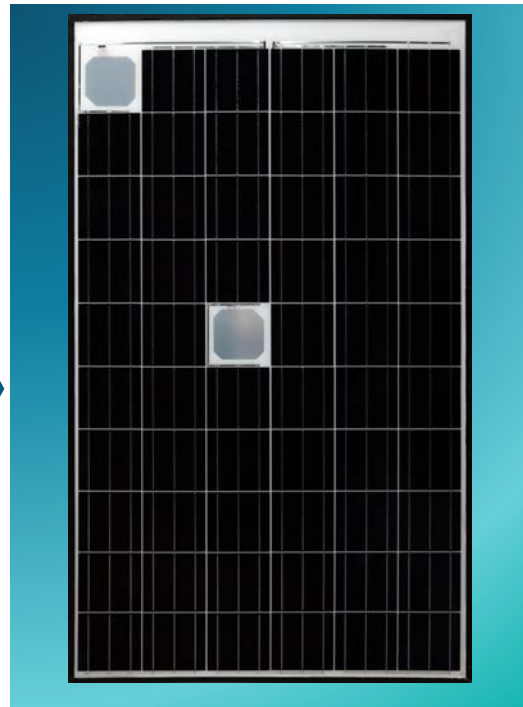
Standard PV Modul

Validierung Mechanische Last



SenSoCells® Funktionsprinzip [1]

Piezoresistivität von lokal hochdotiertem Silizium: $\Delta R \propto \sigma$



PV Module mit SenSoCells®

Positioniert an hochbelasteten Stellen



Abstandssensor

SenSoCell®

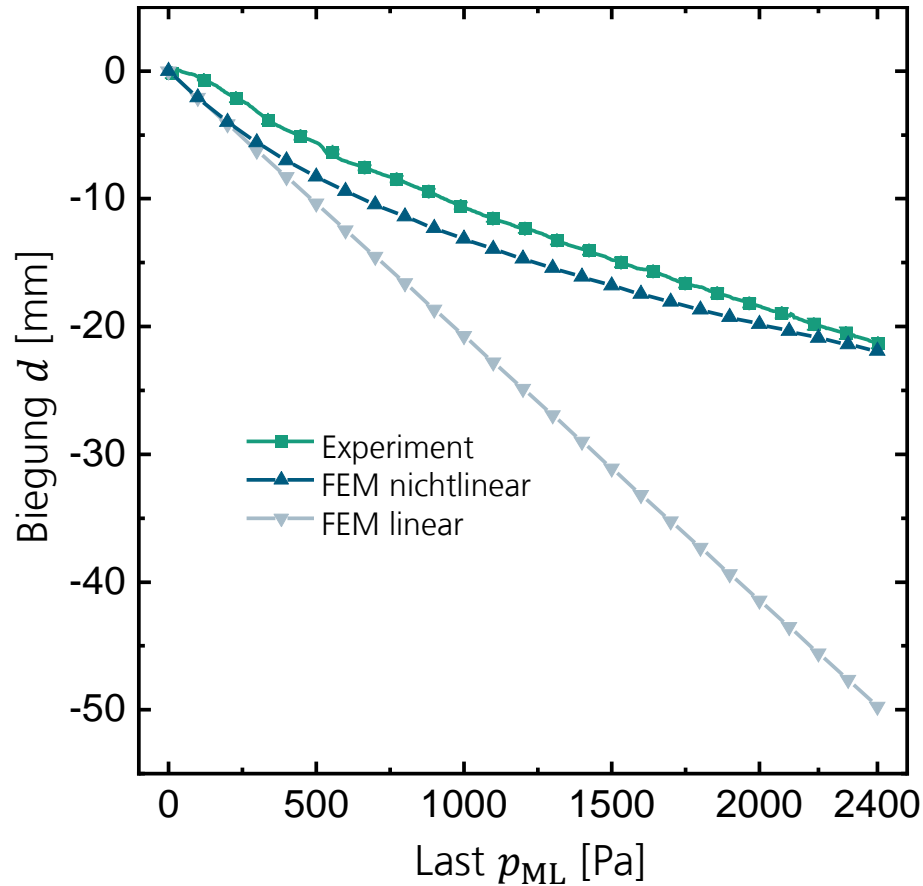
Prüfstempel

Mechanischer Lasttest nach IEC 61215-2:2016

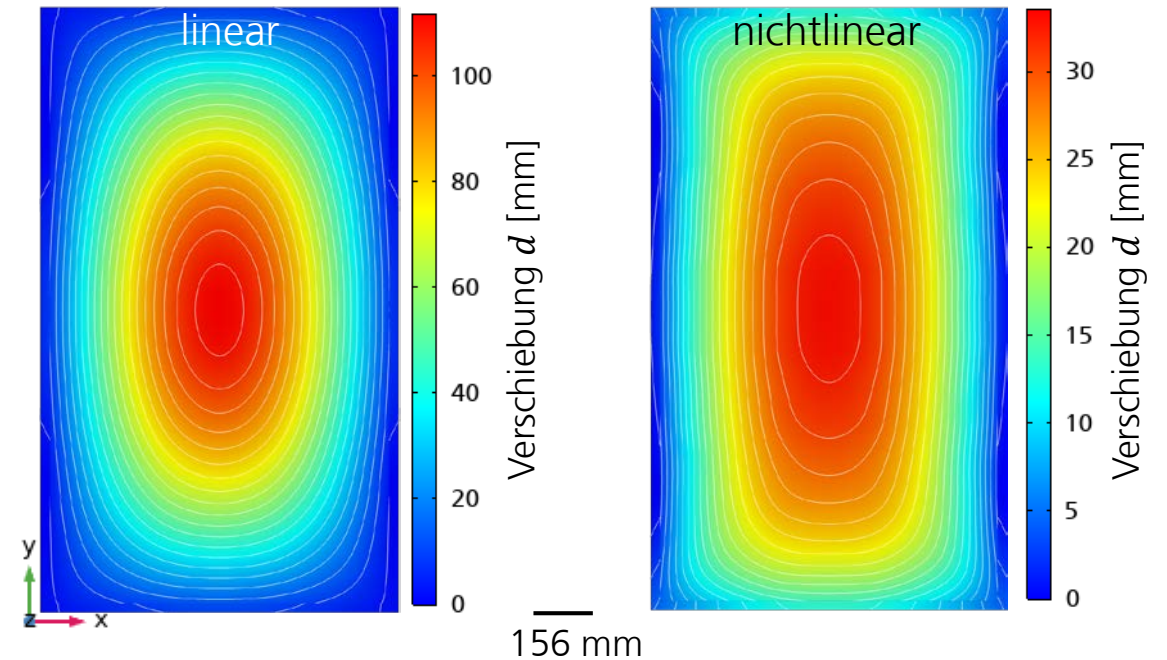
Abgleich Biegung und mech. Spannung

Standard PV Modul

Validierung Mechanische Last | Biegung

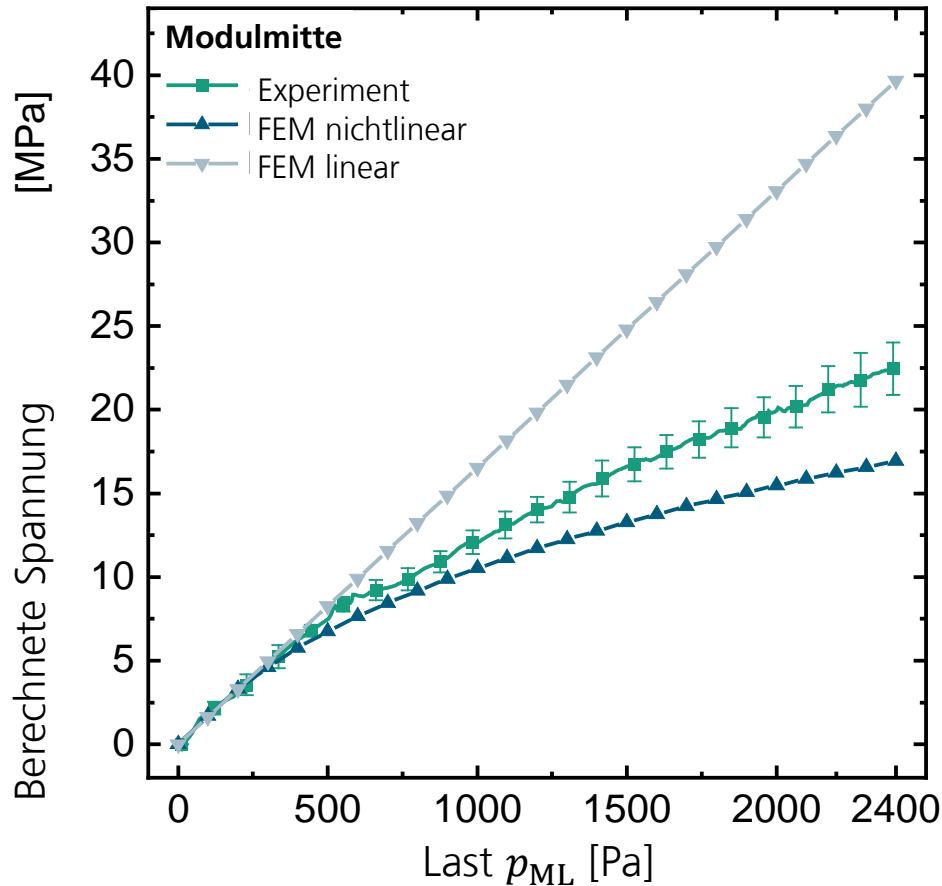


- **Geometrisch-lineare** Simulation überschätzt die Biegung stark
- **Geometrisch-nichtlineare** Simulation überschätzt Durchbiegung leicht
- Unterschiedliches Verschiebungsmuster



Standard PV Modul

Validierung Mechanische Last | Mechanische Spannung Modulmitte



- **Geometrisch-lineare** Simulation überschätzt die Spannung stark
- **Geometrisch-nichtlineare** Simulation
 - <1000 Pa: Gute Übereinstimmung mit <2 MPa Abweichung
 - >1000 Pa: Abweichung von Experimenten
 - Ursache: Toleranz des Rahmeneckverbinders und vermutlich seine plastische Verformung → Rahmentranslation&-torsion beobachtet >1000 Pa.



Standard PV Modul

Anwendungsbeispiel: Klemmbereich Mechanische Last

Relevanz

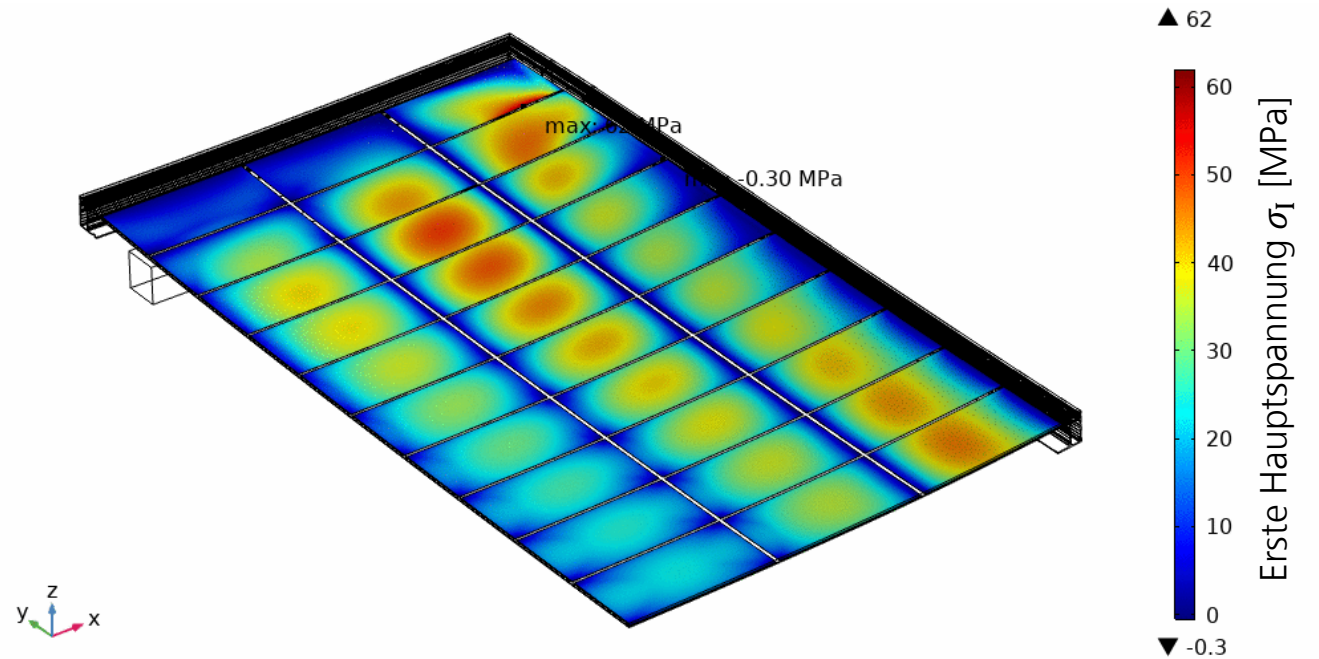
- Klemmposition beeinflusst mechanische Stabilität
- Klemmbereich erleichtert Montage

Ziel

- Identifizierung der idealen Klemmposition und Klemmbereichs

Vorgehen

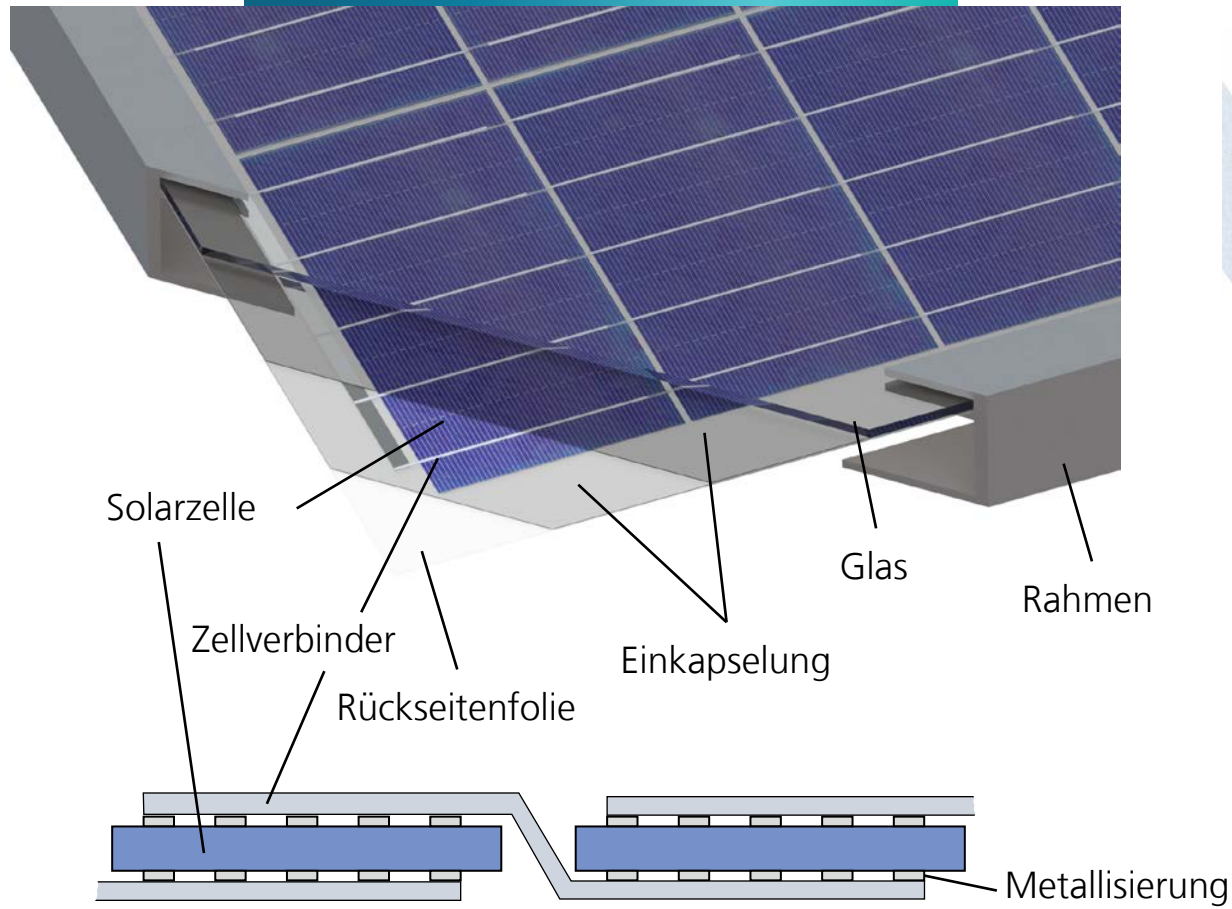
- Parametervariation der Klemmposition und Montageschiene
- Bestimmung der idealen Klemmposition nach minimaler Biegung und Zellbruchwahrscheinlichkeit
- Bestimmung des Klemmbereichs durch Festlegung eines Toleranzbereiches, z.B. $\pm 5\%$ der Biegung



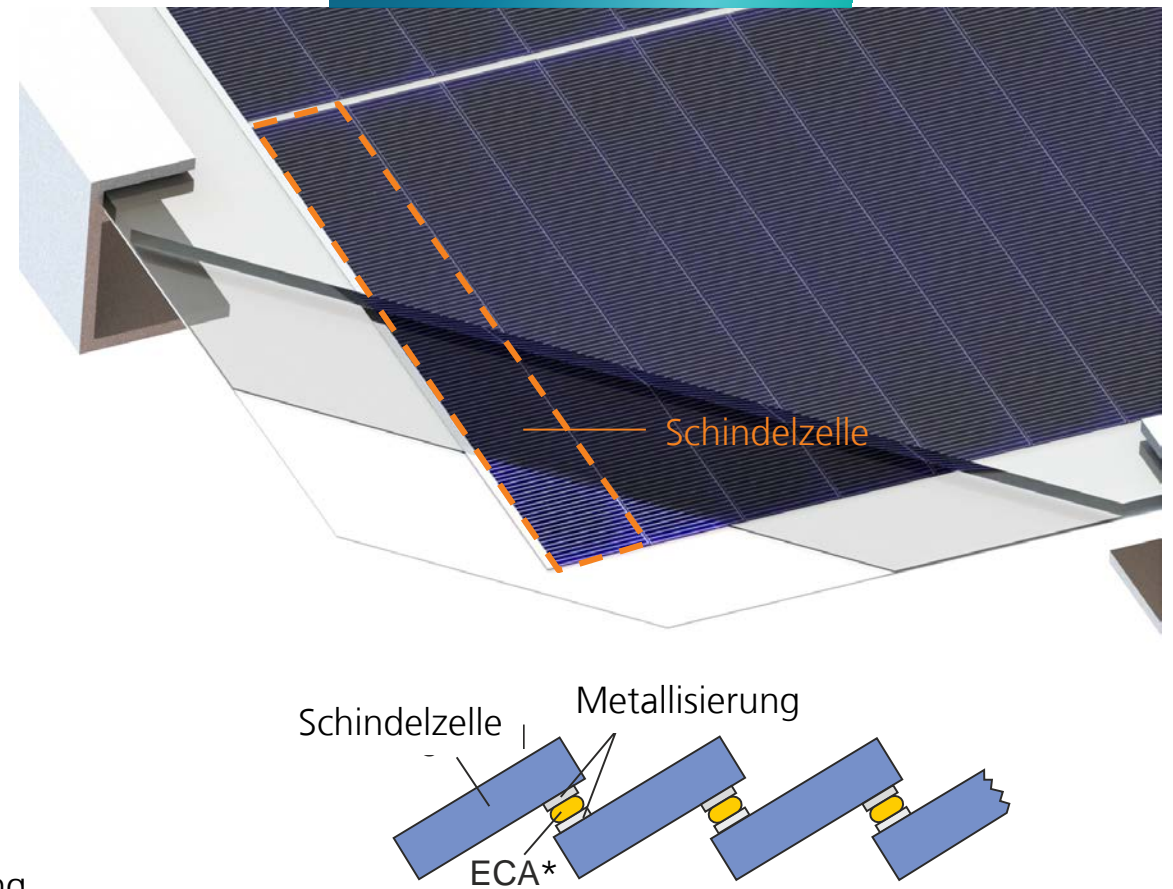
Symmetrieelement (1/4-Modul) mit simulierter Zugspannung in Solarzellen bei 8000 Pa Drucklast.

Schindelfügestelle

Konventionelle Verschaltung



Schindelverschaltung



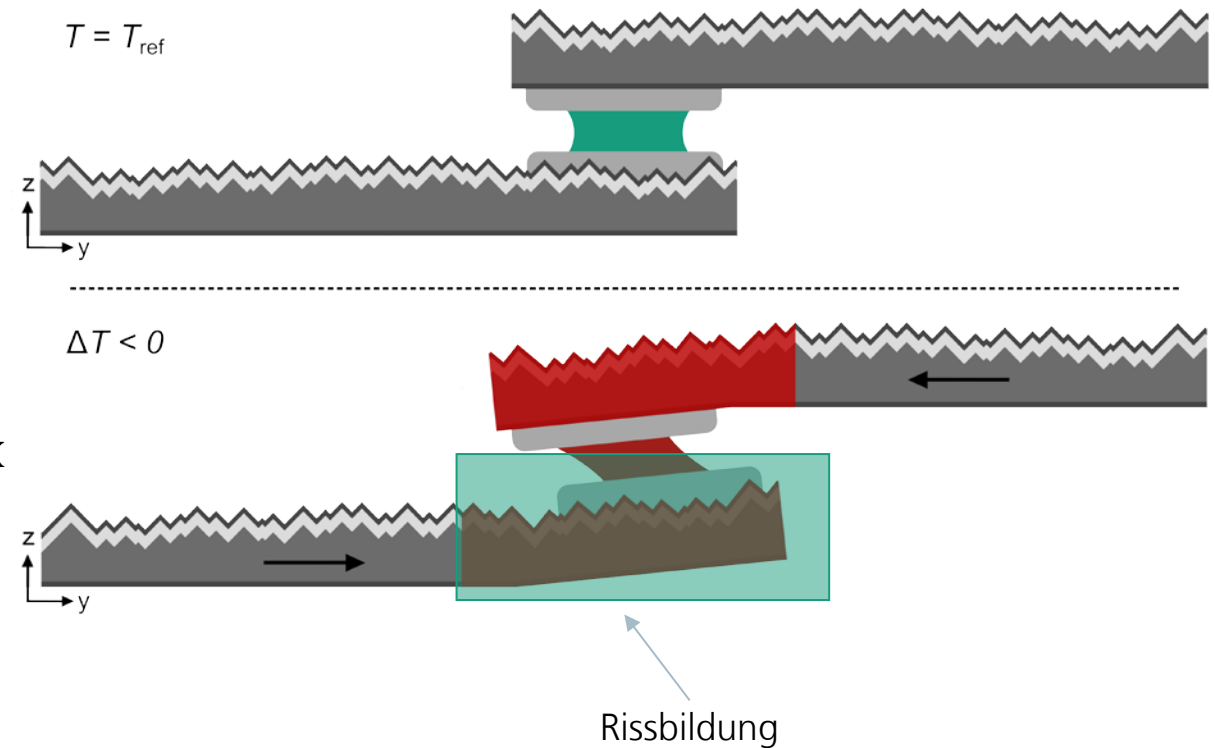
Schindelfügestelle

Thermische Lasten

Betrieb von Solarmodulen

- Stark schwankende Temperaturen
 - Tägliche/Saisonale Schwankungen
 - Verschattung
- Temperaturänderungen führen zu Verschiebungen der Solarzellen [6]
- Belastung von **Fügestelle** und **Solarzelle**
- Relevante Temperaturen
 - Referenztemperatur: Lamination **160 °C**
 - Tiefe Temperaturen, z.B. IEC 61215
Thermischer Zyklentest **-40 °C**

$$\Delta T = -200 \text{ K}$$



Schindelfügestelle

Beobachtung von Zellrissen

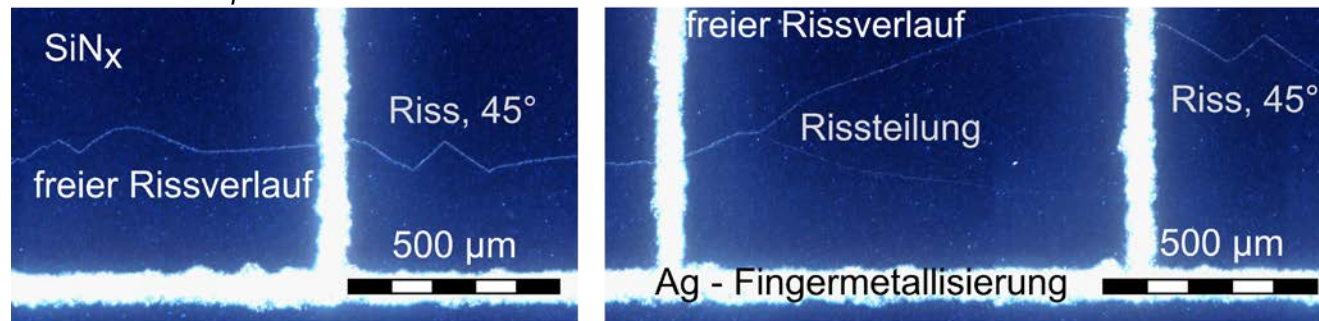
Beobachtung

- Risse parallel zu ECA Auftrag
 - Nur auf gesamter ECA Fläche auf
 - Unterbrechung, bei ECA Unterbrechung

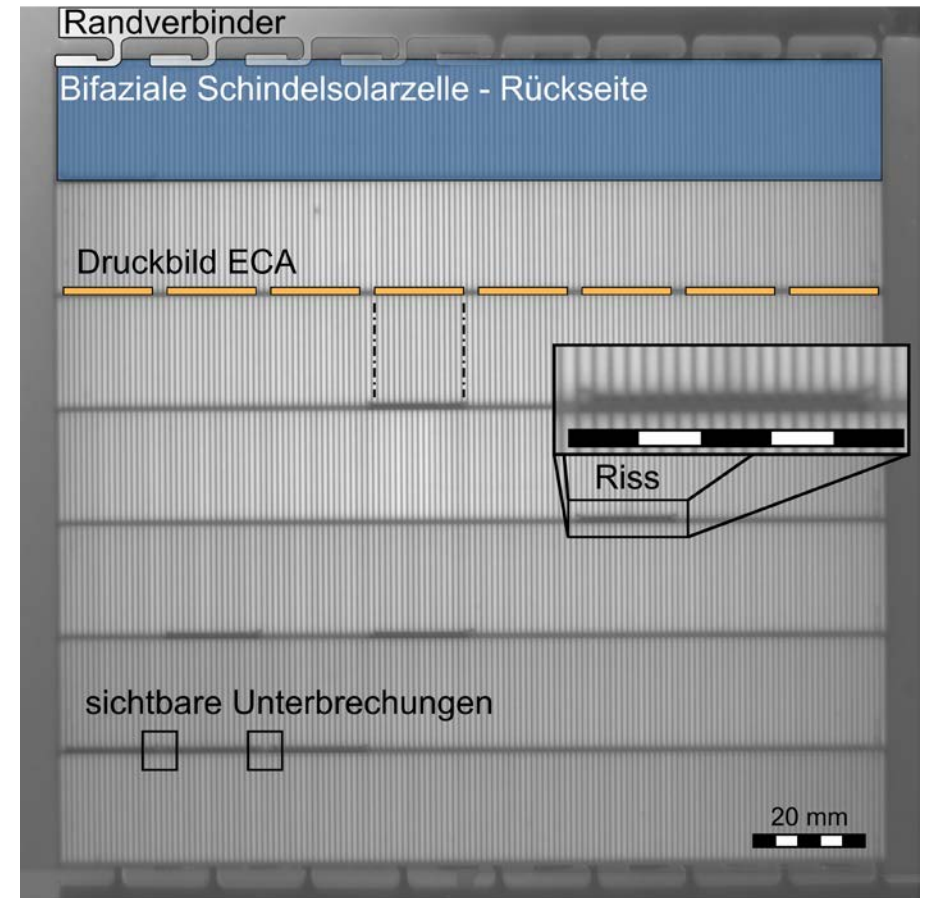
Hypothesen

- Zugspannung übersteigt Bruchspannung $\sigma_I \gg \sigma_{krit}$
- Hohe Spannung ist räumlich auf ECA-Kontaktfläche beschränkt

Lichtmikroskopie im Dunkelfeld-Modus



Photolumineszenz Aufnahme



Schindelfügestelle

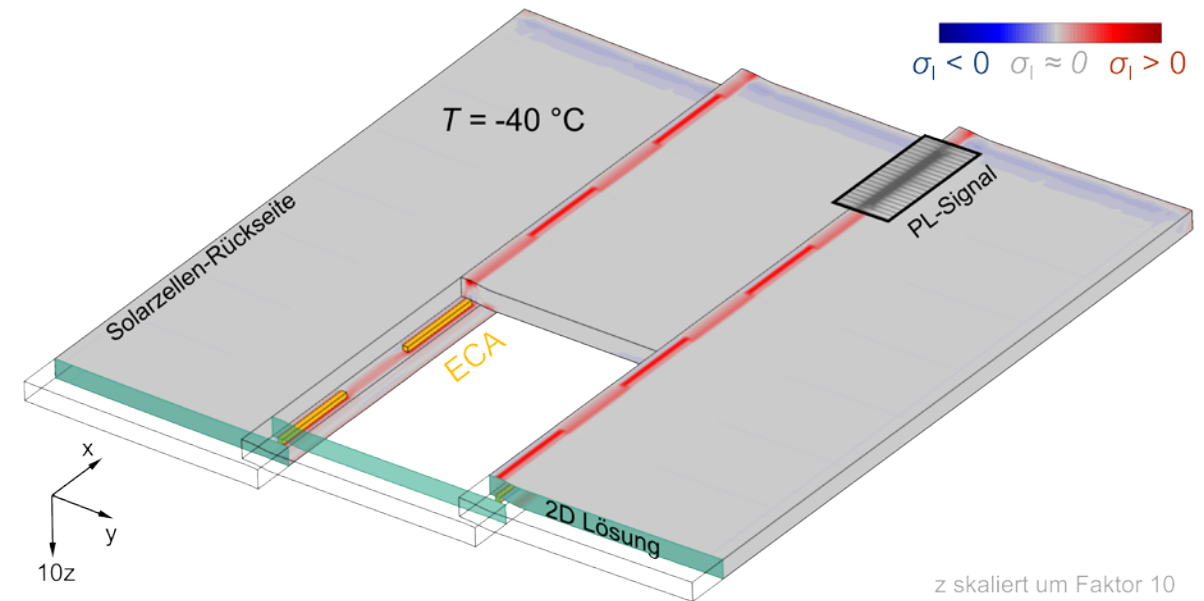
Untersuchung mit Finite Elemente Modell | 3D

FEM Modell

- 5 Schindelzellen (zwei ausgeblendet in Grafik)
- Glas-Folie Laminat
- Schindelfügestelle mit 8 ECA-Pads
- Symmetrie in x → halbe Geometrie

Beobachtungen

- Räumlich stark begrenzte Bereiche mit hohem σ_I
- Zwischen den ECA Pads ist σ_I signifikant geringer



Schindelfügestelle

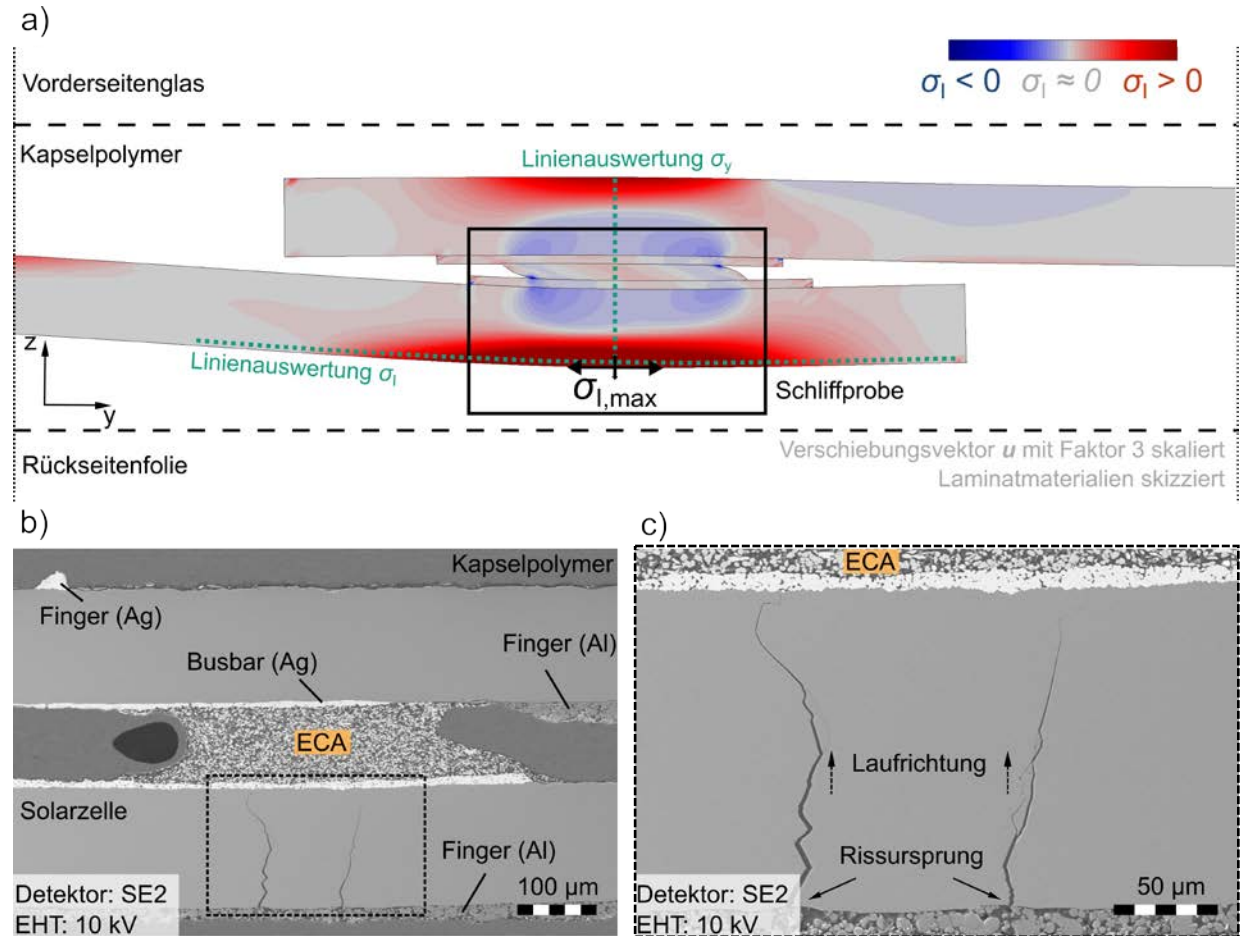
Korrelation mit Schliifproben | 2D

Beobachtungen FEM

- $\sigma_{I,max}$ zentral unterhalb des ECA Pads
- Zugspannungen auf Zelloberflächen
- Asymmetrie zwischen oberer und unterer Solarzelle
- Biegung der Solarzellen um Fügestelle

Beobachtungen aus EL und metallographischen Schliif

- Elektrolumineszenz (EL):
 - Risse entstehen in 178/180 Fällen auf Rückseite
- Metallographie:
 - Rissursprung auf Solarzelloberflächen
 - Rissursprünge im Zentrum unterhalb des ECA



Schindelfügestelle

Aufklärung Defektmechanismus

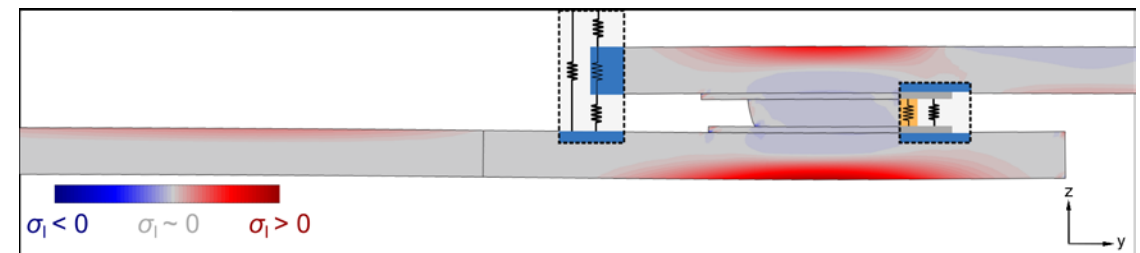
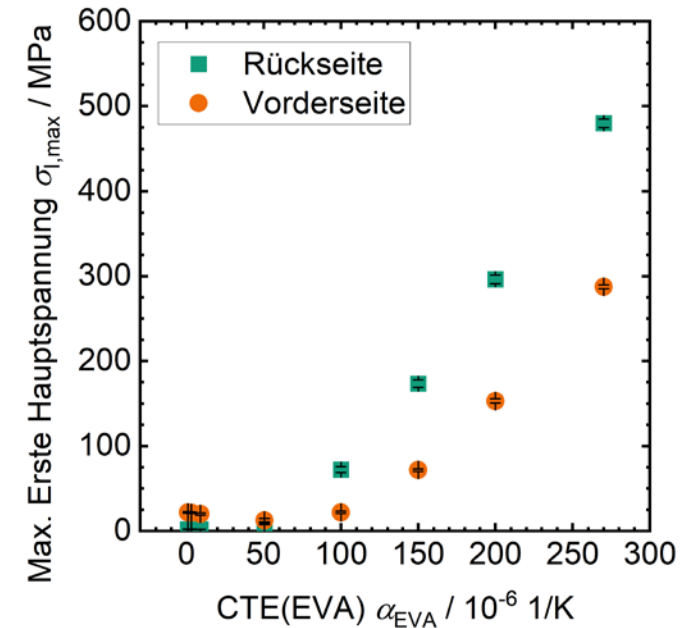
Parametersensitivitätsstudie

- Fügestellen-Geometrie
- Materialeigenschaften

Defektmechanismus

- z-Kontraktion der Eikapselung
- Schindelzelle wird um Fügestelle gebogen
- Ursache: CTE-Unterschied und thermische Dehnung in z-Richtung

Spannungsreduktion durch geschickte Materialauswahl



Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

Dr.-Ing. Andreas Beinert

Finite Element Methoden | Modultechnologie

+49 761 4588 5630

andreas.beinert@ise.fraunhofer.de

www.ise.fraunhofer.de/FEM