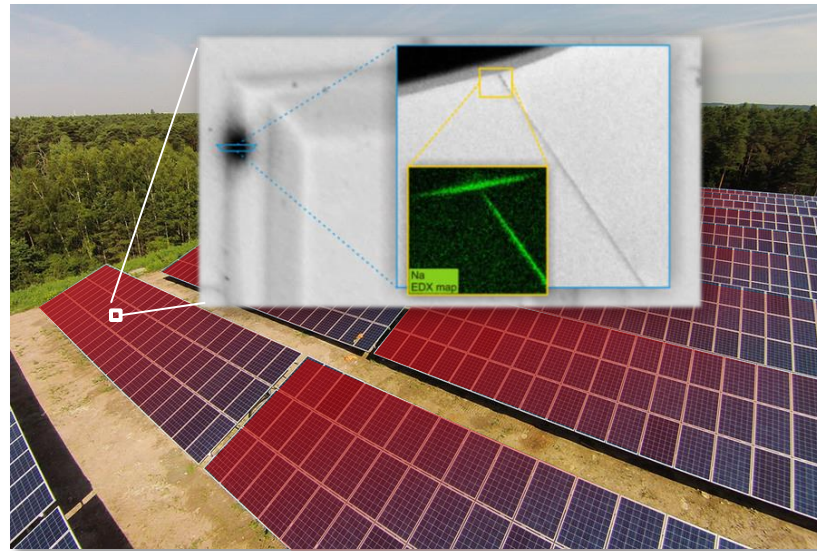


Potential-induzierte Degradation – Ursachen, Einflussfaktoren und Vorhersage im Freifeld



Volker Naumann | pv magazine Webinar „Das PID-Problem ist bewältigt, oder?“ | 22.03.2018

Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP

- gegründet 2007 als Gemeinschaftseinrichtung von Fraunhofer IWM (jetzt Fraunhofer IMWS) und Fraunhofer ISE
- Leitung
 - Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn (komm.)
 - Prof. Dr. Peter Dold
- Standorte:
 - Weinberg Campus in Halle (Saale)
 - MTZ im ValuePark Schkopau
- ca. 70 Mitarbeiter + Studenten und Gäste
- Angewandte Forschung vom Silizium als Ausgangsmaterial bis zum fertigen Solarmodul



Institutsgebäude am Weinberg Campus



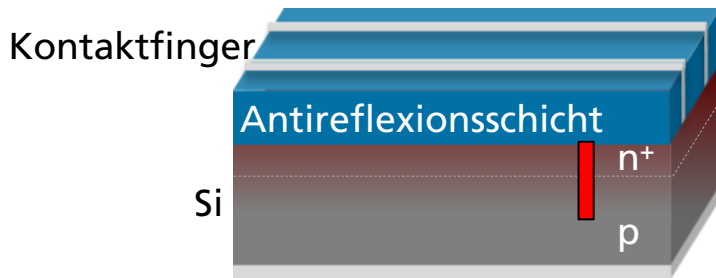
Modultechnologiezentrum Schkopau

Inhalt

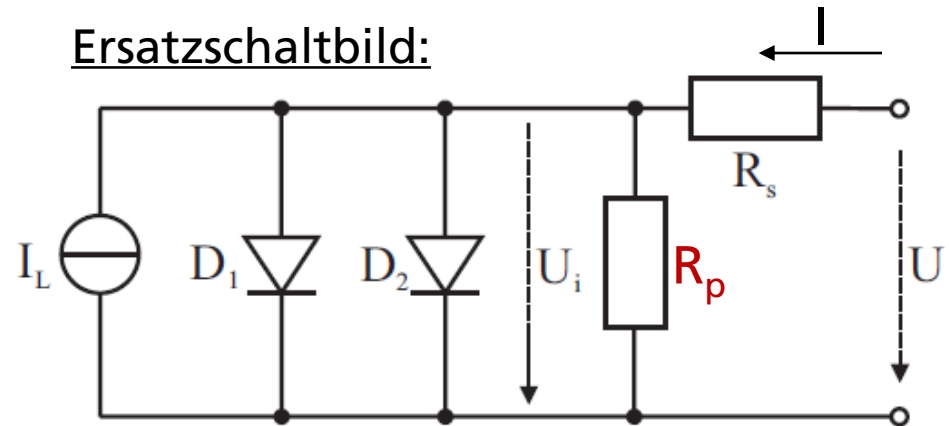
- Ursache von PID bei Silizium-Solarzellen
- Spannungsteilermodell für Module
- PID-Tests und Vorhersagen in bestehenden PV-Anlagen

Die Silizium-Solarzelle

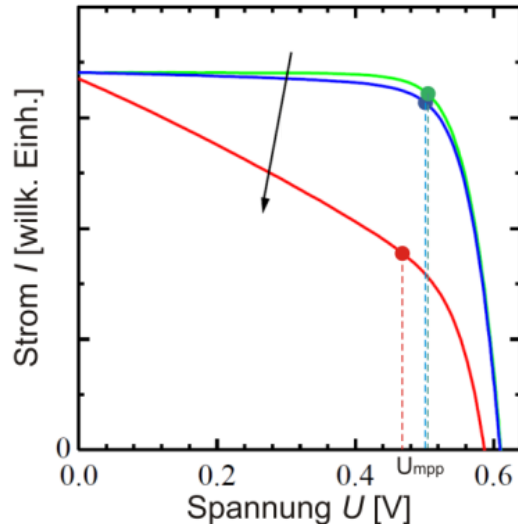
Solarzelle im Querschnitt:



Ersatzschaltbild:



$$I = I_{D1}(U_i) + I_{D2}(U_i) + \frac{U_i}{R_p} - I_L, \quad U_i = U - IR_s$$



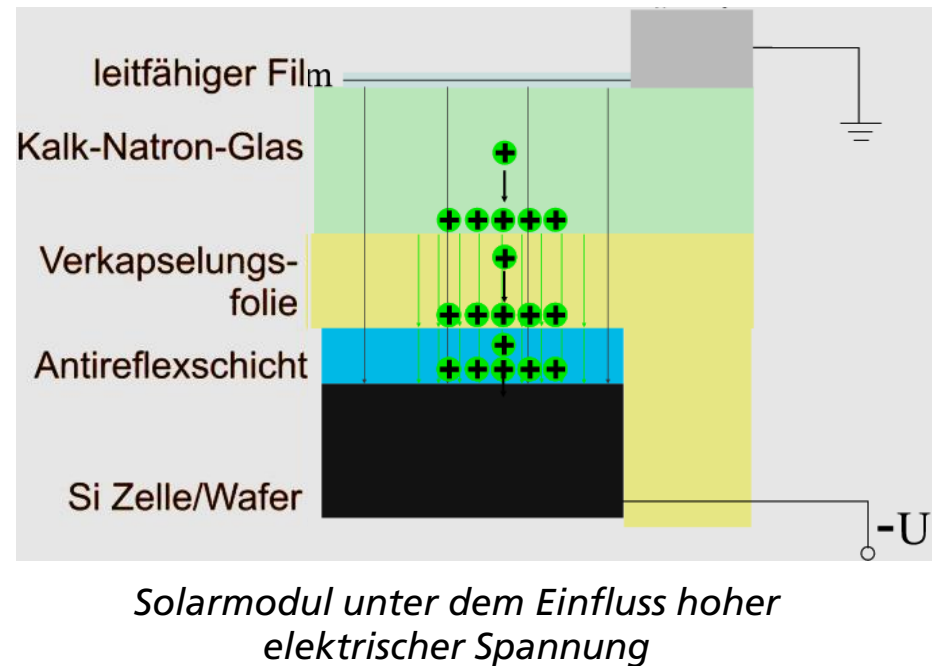
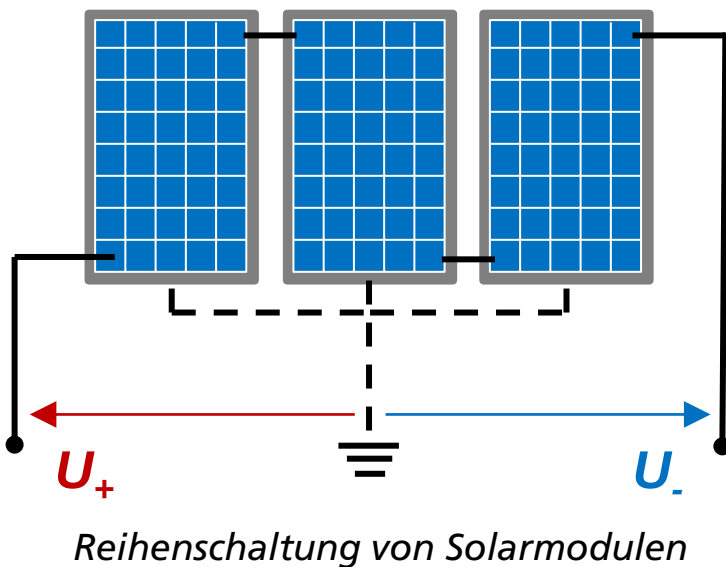
[1]

Leistungsverlust in Solarzellen durch Kurzschlüsse:

- ohmsche Kurzschlüsse bewirken Stromverluste
- Verringerung des Parallelwiderstands

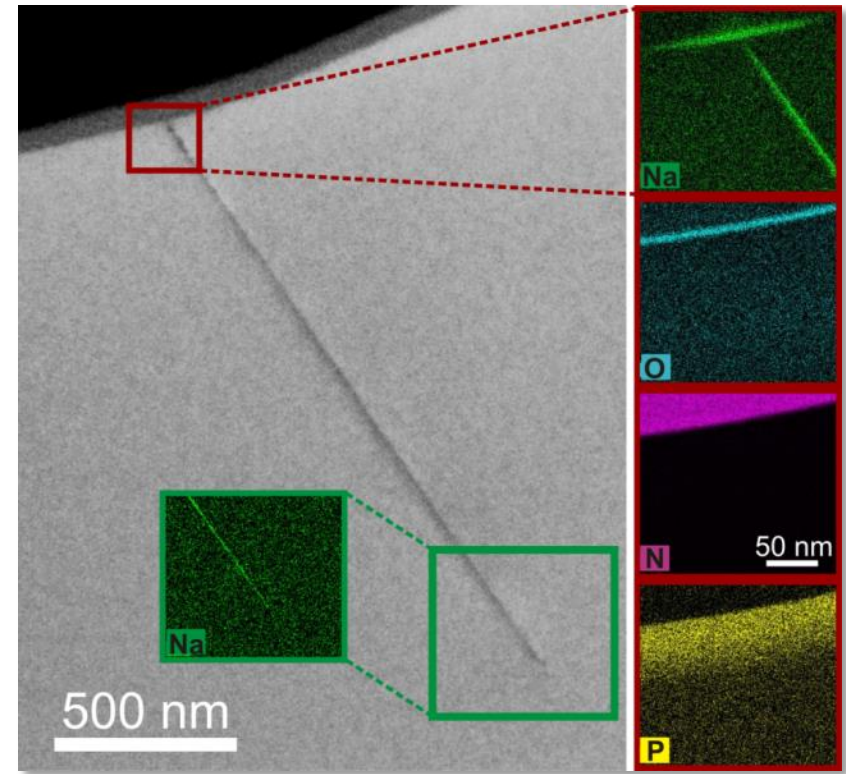
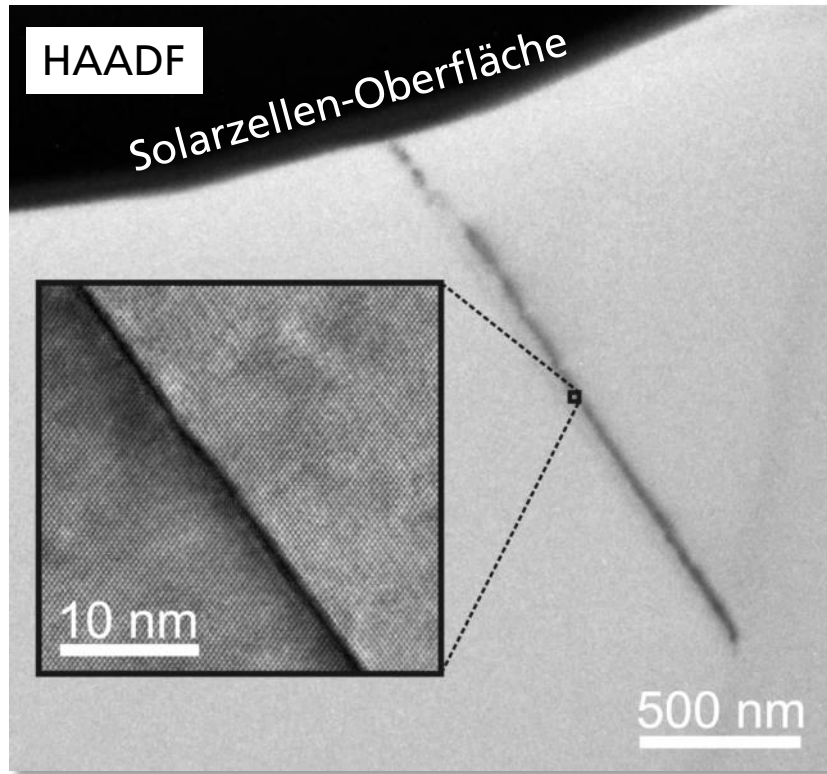
Potential-induzierte Degradation in Solarmodulen

- starker Leistungsverlust von Photovoltaik-Modulen mit Si-Solarzellen
- PID mit Verringerung des Parallelwiderstands („Shunting“) → **PID-s**
- Ursache: hohe Spannung zwischen Modulglasvorderseite und Solarzellen
- „Leckstrom“ durch Glas, Polymerfolie und Solarzellen-Antireflexschicht ^[1]



Nanometer-große Defekte sind für PID-s verantwortlich

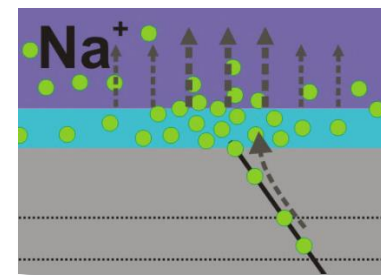
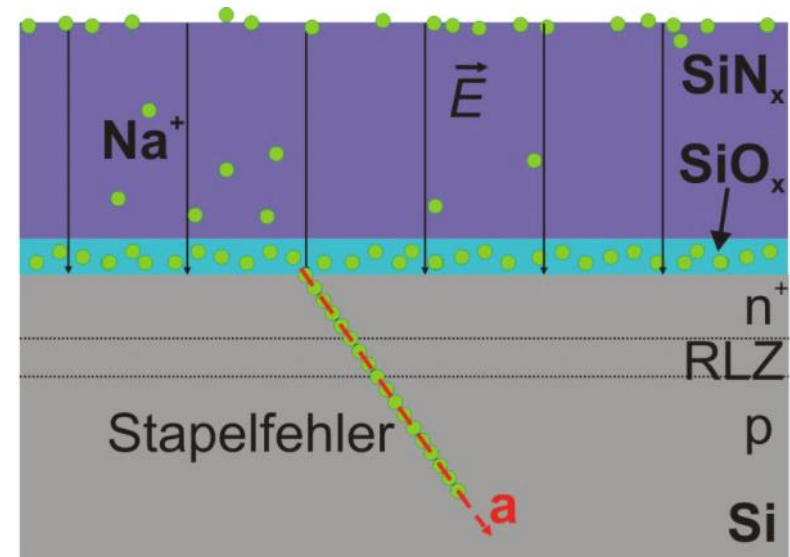
Elektronenmikroskopie an dünnem Querschnitt der Solarzellenoberfläche



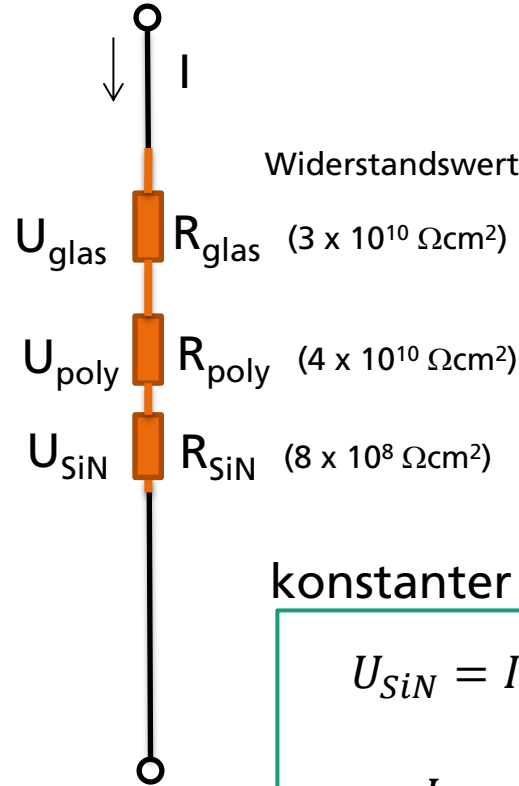
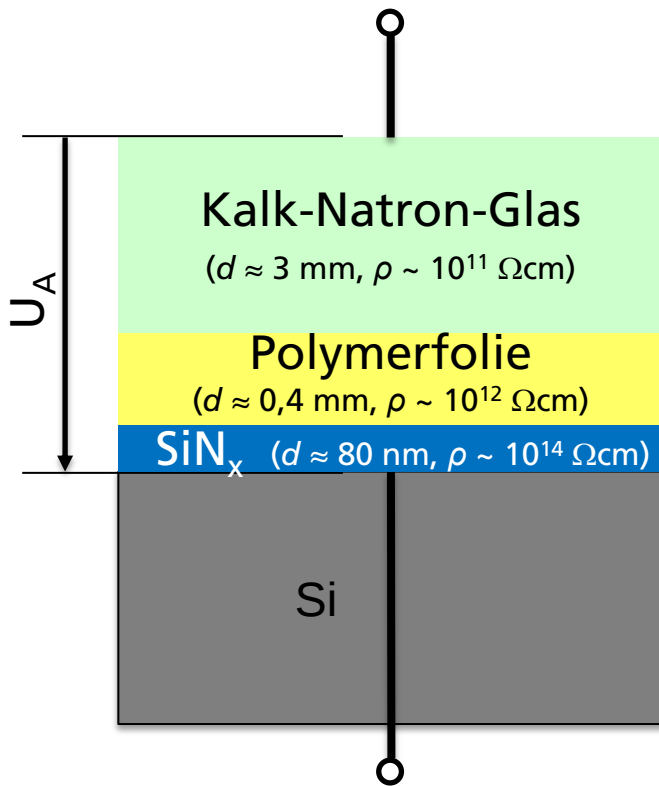
- 2D-Kristalldefekte im Silizium unterhalb der SiN_x -Grenzfläche
- in der Defektebene ist Natrium angereichert ^[1]

Modell für PID-Kurzschlussdefekte

- Ionendrift Na^+ in Si_3N_4 ab 2-4 MV/cm ^[1]
 - Anreicherung von $\text{Na}^{(0)}$ an der SiN_x/Si -Grenzfläche
 - Natriumatome diffundieren in die Stapelfehlerebene ^[2]
 - Defektdichte variabel, beeinflusst durch z.B. Oberflächentextur, Kratzer
-
- Regeneration von PID-s
 - thermisch oder durch entgegengesetztes Potential
 - Ausdiffusion von Natrium experimentell nachgewiesen ^[3]



Spannungsteilermodell für den Modulschichtstapel



konstanter Stromfluss :

$$U_{\text{SiN}} = I \cdot R_{\text{SiN}}$$

$$I = \frac{U_A}{R_{\text{glas}} + R_{\text{poly}} + R_{\text{SiN}}}$$

$$U_{\text{SiN}} = \frac{R_{\text{SiN}}}{R_{\text{glas}} + R_{\text{poly}} + R_{\text{SiN}}} U_A$$

- kritischer Parameter für PID:
Spannung über SiN_x -Schicht U_{SiN}
→ *Drift von Natrium-Ionen*

Resistenz gegen PID

Erklärung mit Spannungsteilermodell:

$$U_{SiN} = \frac{R_{SiN}}{R_{glas} + R_{poly} + R_{SiN}} U_A$$

System-Ebene

→ Vermeidung hoher negativer Spannung gegen Erdpotential^[1] $U_A \rightarrow 0 \rightarrow U_{SiN} \rightarrow 0$

Modul-Ebene

Modulglas mit reduziertem Gehalt an mobilen Ionen^[2]

$R_{glas} \uparrow \rightarrow I \downarrow \rightarrow U_{SiN} \downarrow$

→ Polymerfolien mit reduzierter Ladungsträgermobilität^[1, 2]

$R_{poly} \uparrow \rightarrow I \downarrow \rightarrow U_{SiN} \downarrow$

Zellen-Ebene

→ erhöhte Leitfähigkeit der SiN_x-Schicht (Erhöhung des Brechungsindex^[1, 3], Dotierung der SiN_x-Schicht^[4])

$R_{SiN} \downarrow \rightarrow U_{SiN} \downarrow$

[1] S. Pingel et al., in: Proc. 35th IEEE PVSC, Honolulu, USA (2010), 2817–2822.

[2] P. Hacke et al., in: Proc. 37th IEEE PVSC, Seattle, USA (2011), 814–820.

[3] H. Nagel et al., in: Proc. 26th EU-PVSEC, Hamburg (2011), 3107–3112.

[4] Patent DE 10.2010.017.461.A1 2011.12.22.

Zunahme der PID-Anfälligkeit installierter Module

1. (spezifischer) Widerstand der Polymer-Verkapselungsfolie ist nicht konstant, abhängig von:

- Temperatur
- Wassergehalt der Folie

$$U_{SiN} = \frac{R_{SiN}}{R_{glas} + R_{poly} + R_{SiN}} U_A$$

2. Erdung der Moduloberfläche durch Verschmutzung
 - Beschleunigungsfaktor bei PID-Anfälligkeit

→ Leckstrom steigt an

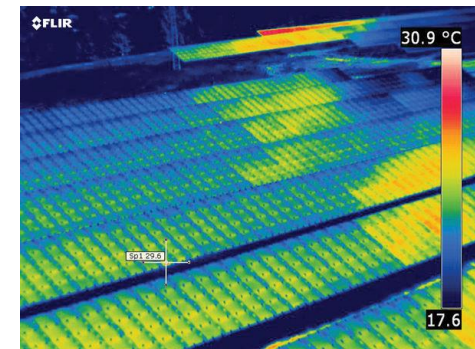
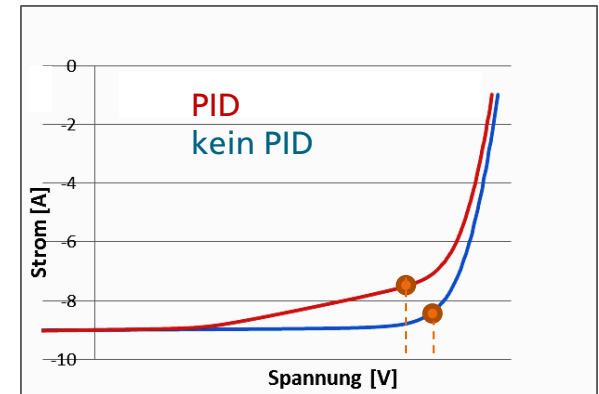
→ Degradationsrate nimmt zu



https://www.solarreinigung-bayreuth.de/wp-content/uploads/2018/02/IMG_6921-e1519225501890-770x513.jpg

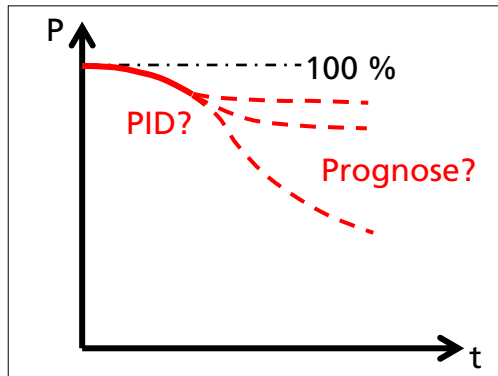
Nachweis von bestehender PID in PV-Anlagen

- Vergleichende Spannungsmessung an Modulsträngen
 - Elektrolumineszenzaufnahmen bei Vorwärtsbestromung
 - Thermographie unter Betriebsbedingungen
- Aufnahme des Ist-Zustands



https://www.photovoltaiik.eu/gentner.dli/POPUP?CMD=IMG_ZOOM&FID=554678&MID=110500

PID-Tests zur Vorhersage von PID – bisher nur im Prüflabor



*Demontage
notwendig*



Prüflabor

Lösungsansatz und Ziel:

PID-Tests im Freifeld

- geringere Kosten
- kürzere Dauer bis zum Testresultat

Regeneration von PID

PID-Recovery*

Laufende Forschungsthemen:

- Vorhersage der Regenerationsfähigkeit von PID
- Erarbeitung eines Modulteststandards mit Berücksichtigung von Regeneration
- Einsatz eines neuartigen Freifeld-Testgerätes zur PID-Prognose
- Abschätzung zukünftiger PID sowie der Wirtschaftlichkeit von PID-Gegenmaßnahmen

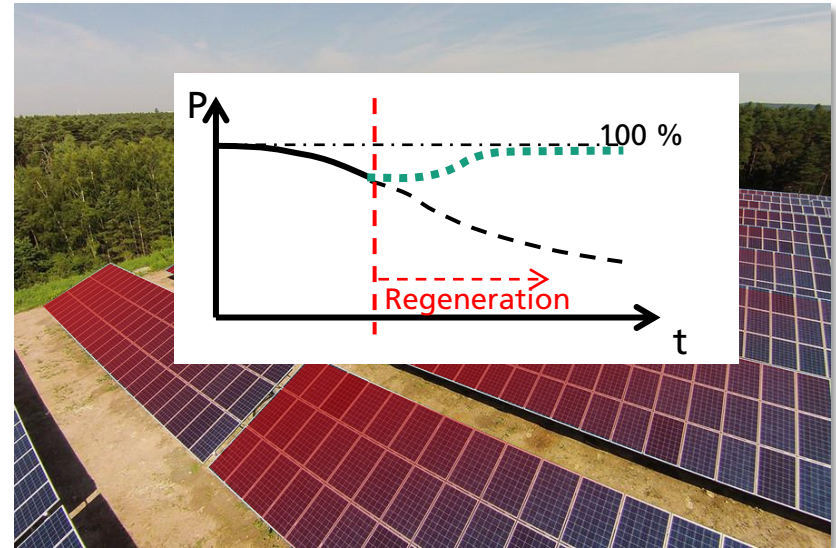
* gefördert durch das BMWi im Projekt „PID-Recovery - Erforschung der Regenerationsfähigkeit und Ableitung von Ertragsprognosen bezüglich Potential-induzierter Degradation für installierte Silizium-Solarmodule“, FKZ: 0324184A

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages





Dr. Volker Naumann

volker.naumann@csp.fraunhofer.de

www.csp.fraunhofer.de