
LICHTINDUZIERTE ANFANGSDEGRADATION: TYPEN, AUSWIRKUNGEN UND TESTVERFAHREN

TECHNISCHE MÖGLICHKEITEN UND HERAUSFORDERUNGEN

DR. BENGT JÄCKEL



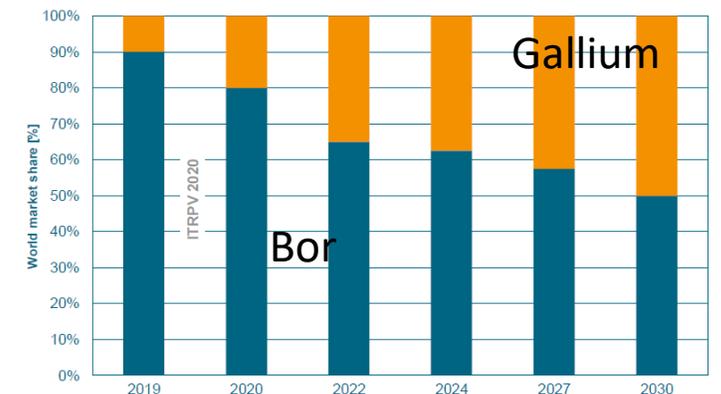
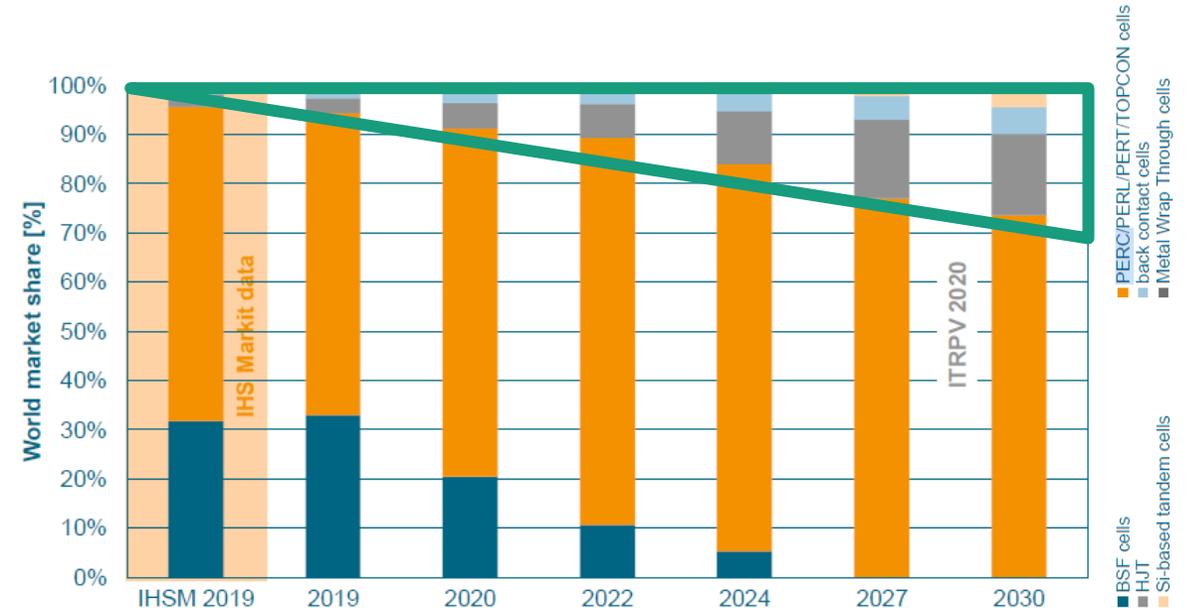
ÜBERSICHT

- **Motivation**
- **Typen Lichtinduzierter Degradation**
 - **LID, LeTID**
- **Ursachen, Einfluss und Vermeidungsstrategien**
- **Aktueller Stand der Tests und Zertifizierung**
 - **IEC 61215-2 MQT 19**
 - **LeTID-Norm**
- **Zusammenfassung**

Motivation

PERC Solarzellen: >65% des Marktes

- LID und LeTID:
 - PERC-typ Zellen (Passivated Emitter Rear Contact) dominieren den Markt^[1]
 - > 80% Marktanteil bis 2022
 - Multi und mono-Si PERC module betroffen^[2-5]
- Neue Zellstrukturen
 - PERT (Passivated Emitter Rear Totally diffused)
 - TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact)
 - Si-HJT (heterojunction technology)
 - Veränderungen in der Dotierung (Bor → Gallium)
 - Verwendung von n-Typ statt p-Typ Wafer Materialien



Frage: Welchen Einfluss wird LID, LeTID und ggf. noch unbekannte Mechanismen auf die Entwicklung haben?

→ Grundsätzliches Verständnis und State of the Art Tests notwendig

[1] ITRPV 2020,

[2] Kersten et al, Sol. Ener. Mat. & Sol. Cells 142 (2015),

[3] Fertig et al, Ener. Proc. 124 (2017) 338-345,

[4] Fung et al, Ener. Proc. 124 (2017),

[5] Luka et al, Sol. Ener. Mat. & sol. Cells 158 (2016),

[6] Fertig et al, Ener. Proc. 124 (2017) 338-345

Typen Lichtinduzierter Degradationen: LID, LeTID, ...

Übersicht

- LID ist seit vielen Jahren bekannt!
- Mechanismus und Auswirkung sind abhängig von Si Material, Zellprozess und Behandlungen):
- Boron-Oxygen (BO) Degradation bei Raumtemperatur in ca. 24 h
 - BO Komplexstrukturen werden unter Beleuchtung erzeugt
 - Verlust ist abhängig von der Bor und Sauerstoffkonzentration im Material
 - Regeneration bei sehr hohen Temperaturen möglich^[1,2]

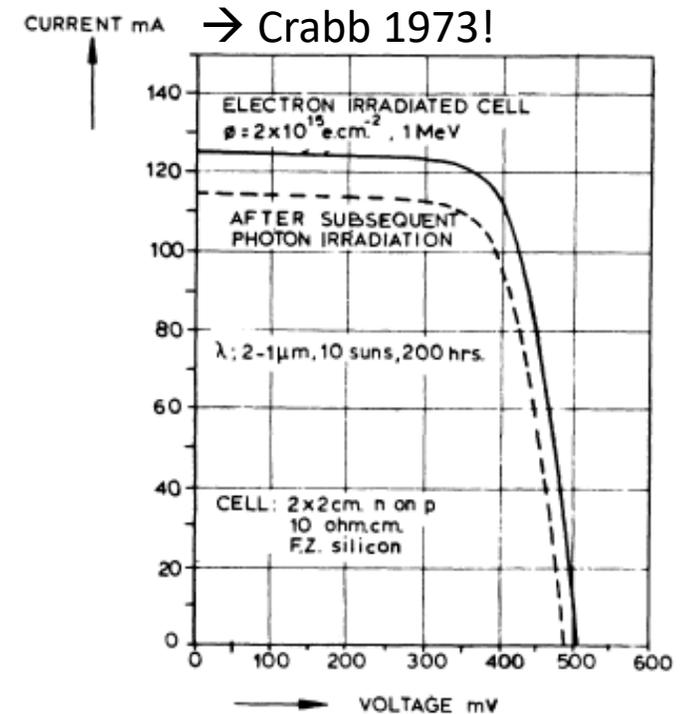
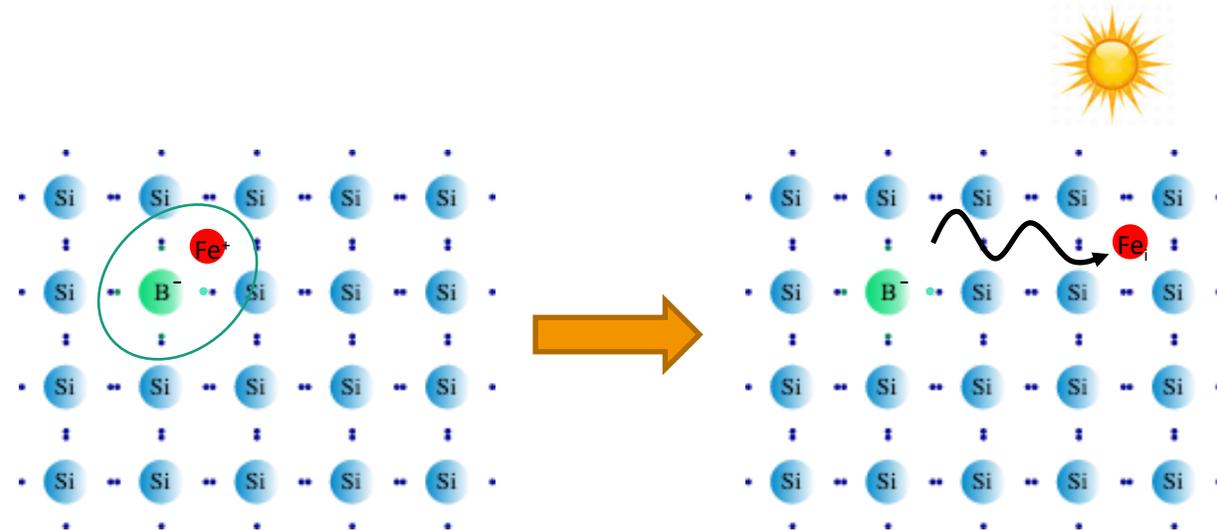


Fig. 1. Solar cell V-I degradation following sequential electron-photon irradiation.

Typen Lichtinduzierter Degradationen: LID, LeTID, ...

Übersicht

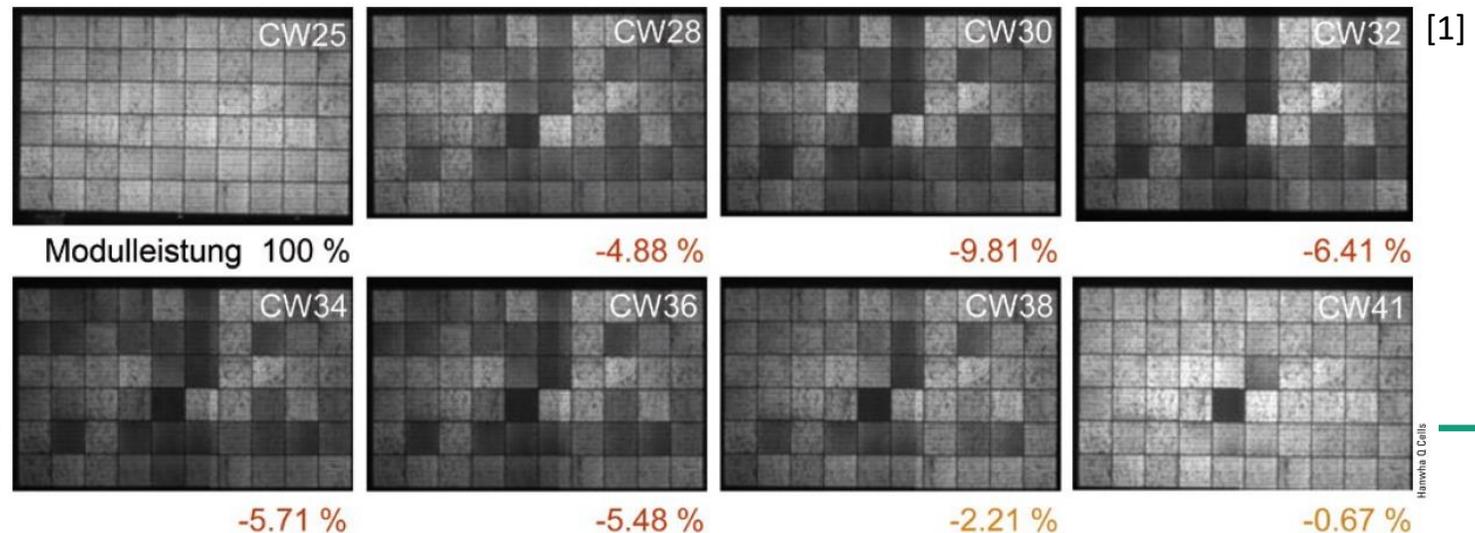
- LID ist seit vielen Jahren bekannt!
- Mechanismus und Auswirkung sind abhängig von Si Material, Zellprozess und Behandlungen):
- Boron-Oxygen (BO) Degradation bei Raumtemperatur in ca. 24 h
- Metall-induziertes LID: Degradation / Regeneration ein paar Minuten
 - Eisen-Boron (FeB) und Kupferdegradation
 - Änderung des Ladungszustandes des Eisens
 - Lockerung der Bindung zwischen B und des Eisens



Typen Lichtinduzierter Degradationen: LID, LeTID, ...

Übersicht

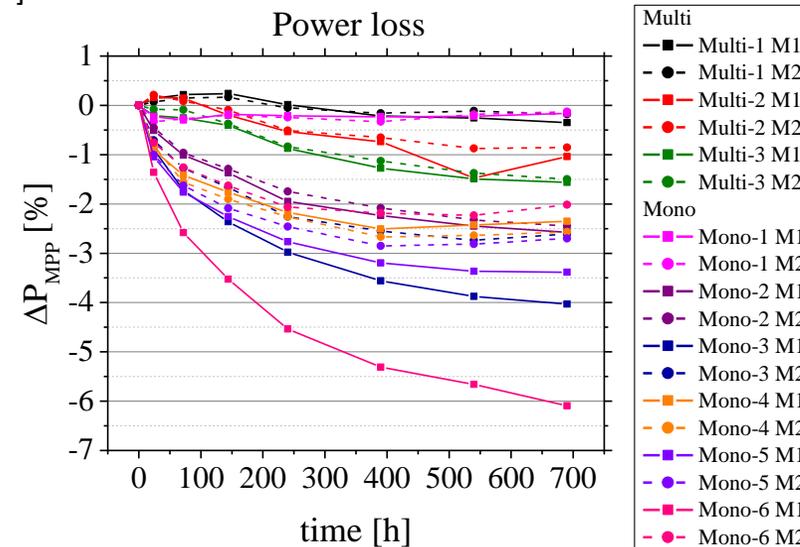
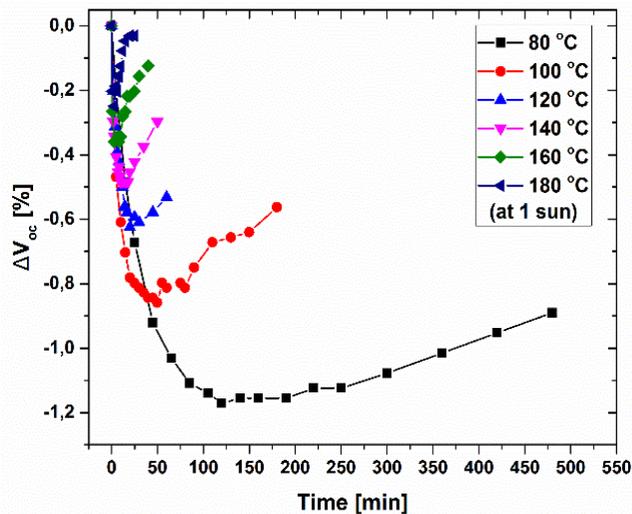
- LID ist seit vielen Jahren bekannt!
- Mechanismus und Auswirkung sind abhängig von Si Material, Zellprozess und Behandlungen):
- Boron-Oxygen (BO) Degradation bei Raumtemperatur in ca. 24 h
- Metall-induziertes LID: Degradation / Regeneration ein paar Minuten
- LeTID Light and elevated Temperature Induced Degradation



[1] Kersten, et al., Solar Energy Materials and Solar Cells, 142, 83 (2015)

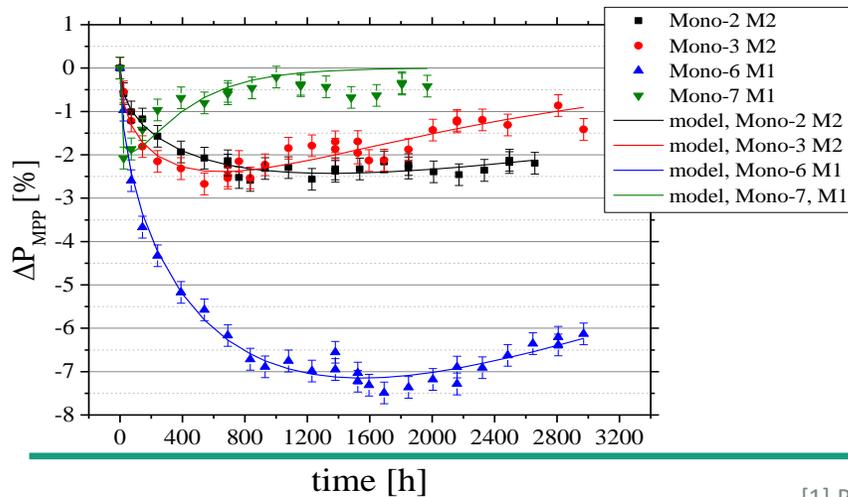
Typen Lichtinduzierter Degradationen: LeTID Übersicht

- Aktivierung bei erhöhten Temperaturen ≥ 50 °C bei PERC
- Verlauf der EL Bilder über „Schachbrettmuster“; nicht, aber leicht, zu verwechseln mit PID!
- Modulleistung kann bis über 10% verlieren
- Einfluss der Temperatur auf Degradation, Regenerationszeit und den maximalen Verlust^[1]
- Verhalten verschiedener Modultypen im LeTID-Test @ 75°C^[1]



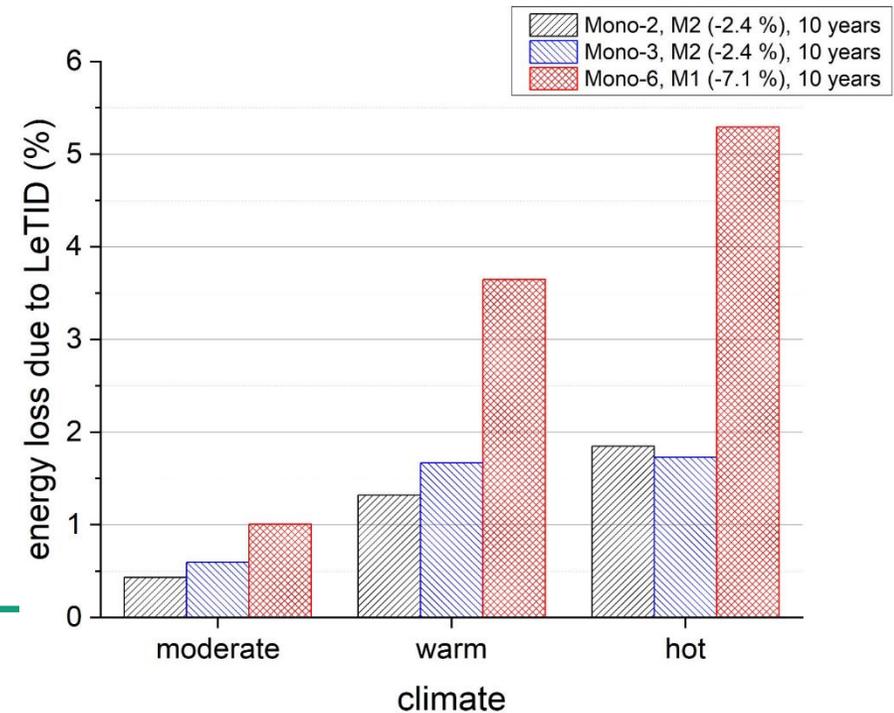
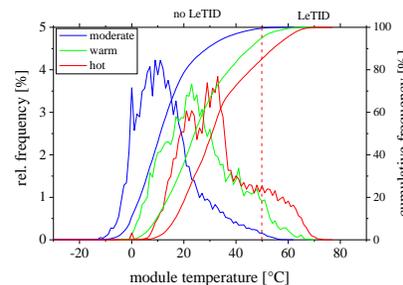
Typen Lichtinduzierter Degradationen: LeTID Übersicht

- Aktivierung bei erhöhten Temperaturen ≥ 50 °C bei PERC
- Verlauf der EL Bilder über „Schachbrettmuster“; nicht, aber leicht, zu verwechseln mit PID!
- Modulleistung kann bis über 10% verlieren
- Einfluss der Temperatur auf Degradation, Regenerationszeit und den maximalen Verlust^[1]
- Verhalten verschiedener Modultypen im LeTID-Test @ 75°C^[1]
- Ertragsverlust abhängig von Klima und Modulverhalten^[1]



Arrhenius-type Temperaturbeschleunigung

$$t_{eqv} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp\left(-\frac{E_A}{R} \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right)$$



Typen Lichtinduzierter Degradationen:

LeTID Übersicht

- Aktivierung bei erhöhten Temperaturen ≥ 50 °C bei PERC
- Verlauf der EL Bilder über „Schachbrettmuster“; nicht, aber leicht, zu verwechseln mit PID!
- Modulleistung kann bis über 10% verlieren
- Einfluss der Temperatur auf Degradation, Regenerationszeit und den maximalen Verlust^[1]
- Verhalten verschiedener Modultypen im LeTID-Test @ 75°C^[1]
- Ertragsverlust abhängig von Klima und Modulverhalten^[1]
- Einflussfaktoren:
 - Schnelldiffundierende Verunreinigungen (Cu, H, Ni, Co)
 - Temperatur $> \sim 50$ °C^[1]
 - Überschussladungsträger \rightarrow Beleuchtung / Strom notwendig^[2]
 - Unabhängig von BO und FeB LID Prozessen
- Mögliche Nachweismethoden: Lichtstabilisierung \rightarrow LID oder Stromstabilisierung \rightarrow CID

Typen Lichtinduzierter Degradationen: LID, LeTID, ...

Übersicht

- LID ist seit vielen Jahren bekannt!
- Mechanismus und Auswirkung sind abhängig von Si Material, Zellprozess und Behandlungen):
- Boron-Oxygen (BO) Degradation bei Raumtemperatur in ca. 24 h
- Metall-induziertes LID: Degradation / Regeneration ein paar Minuten
- LeTID Light and elevated Temperature Induced Degradation
- Unknowns
 - für PERT, TOPCon, HJT,
 - neue Zellstrukturen (z. B. Perovskite Tandems)
 - Dotierstoffe Ga vs B,
 - Basisdotierung des Wafers: p-typ vs n-typ-Silizium

Ursachen, Einfluss und **Vermeidungsstrategien** Defektzustände

■ **Auswahl des Wafermaterials**

- Niedrige Konzentrationen von Verunreinigungen, vor allem metallische Verunreinigungen
- Geringe Bor und Sauerstoffkonzentrationen

■ **Optimierte Zell Herstellungsprozesse**

- Verbesserte Getterprozesse während der P-Diffusion
- Angepasste Feuertemperaturen
- Einführung von Regenerationsprozessen im Zellprozess zur Stabilisierung von Defekten

Testmethoden

LID: IEC 61215-2 MQT 19 Stabilisierung

- Anfangsstabilisierung und Nachweis der Typschildangaben (c-Si → IEC 61215-1-1)
 - Mind. 2 Beleuchtungszyklen á >5kWh/m² (Modultemperatur: 50 ± 10°C)
 - Erfüllung des Stabilitätskriteriums $x = 0,01$

$$(P_{\max} - P_{\min}) / P_{\text{average}} < x$$

- Einhaltung der min. Leistung mit $m \approx 2.5\%$ und $t \approx 3$ bis 5%

$$P_{\max}(\text{Lab}) \cdot \left(1 + \frac{|m_1| [\%]}{100}\right) \geq P_{\max}(\text{NP}) \cdot \left(1 - \frac{|t_1| [\%]}{100}\right)$$

- Ziel: Stabilisierung von BO und FeB LID, nicht LeTID

Testmethoden

LeTID: IEC Aktivitäten (82/1797/NP)

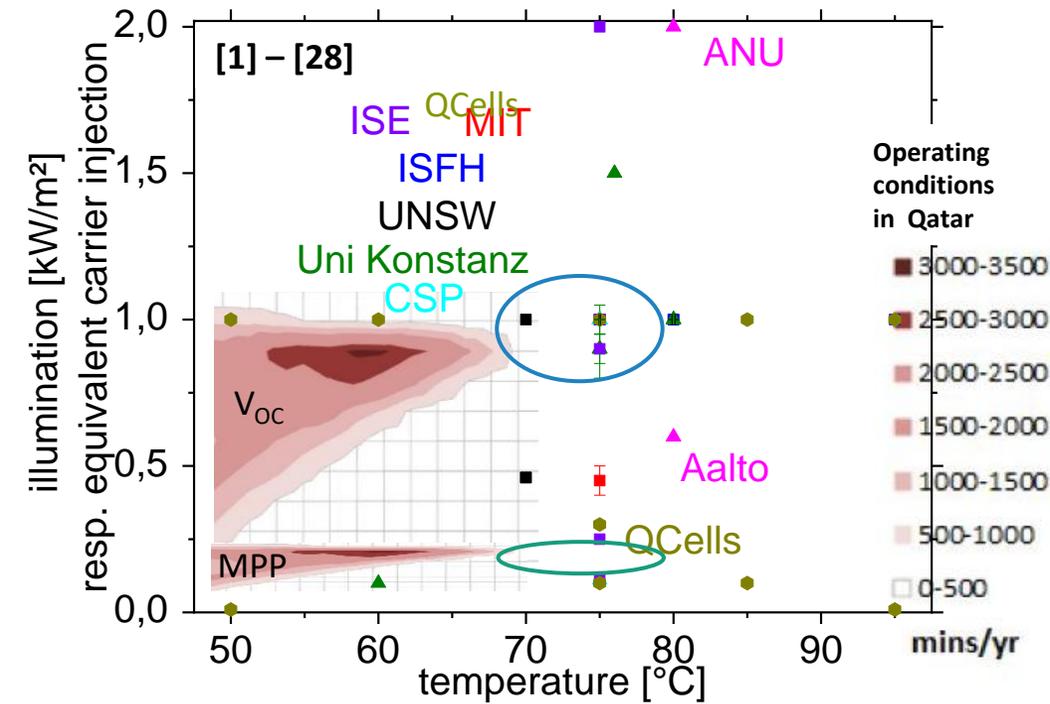
■ Ziel des LeTID-test Standards:

- Quantitative Vergleichbarkeit der Resultate
- Abtrennung BO, FeB von LeTID
- Vergleichbarkeit der Ergebnisse von Zelle bis ins System
- Anpassung an Betriebsbedingungen

■ Aktueller Stand:

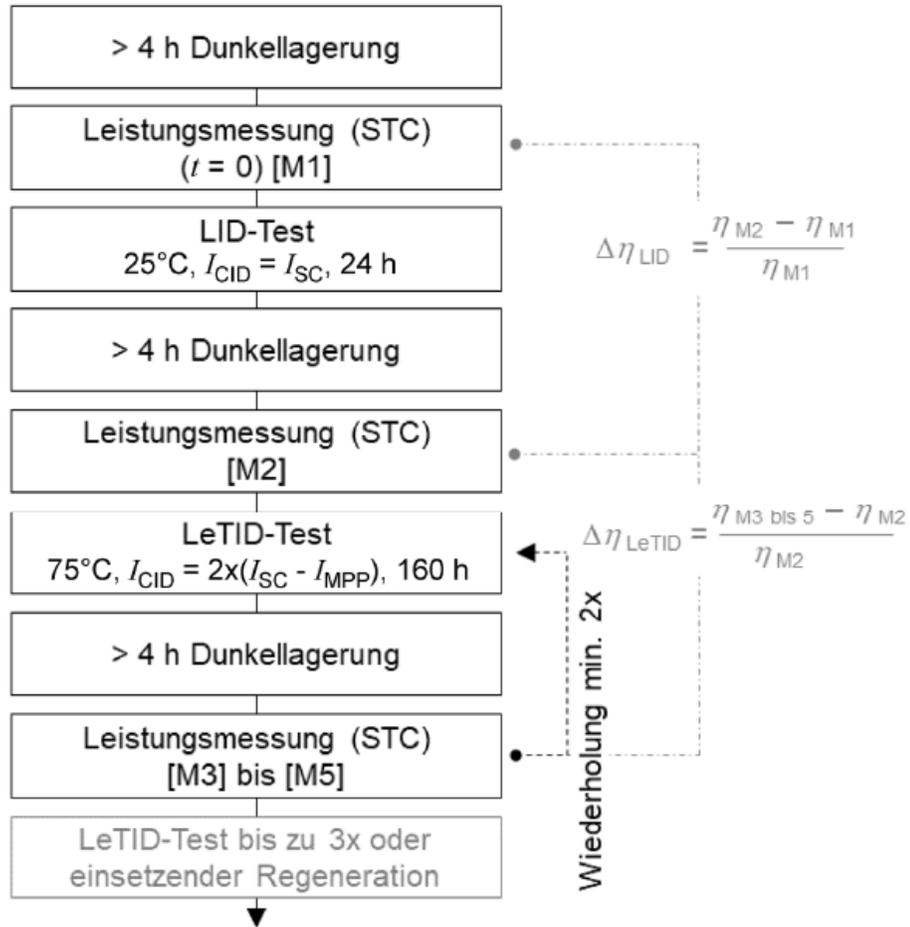
- LID-Differenzierung durch Pre- und Post Behandlung
- Temperatur kritischster Parameter (→ 75 °C)
- Ladungsträgerinjektion notwendig (mit Licht oder Strom)
- Zeitdauer von über 200 Stunden notwendig (bei 75°C)

LeTID Test Conditions



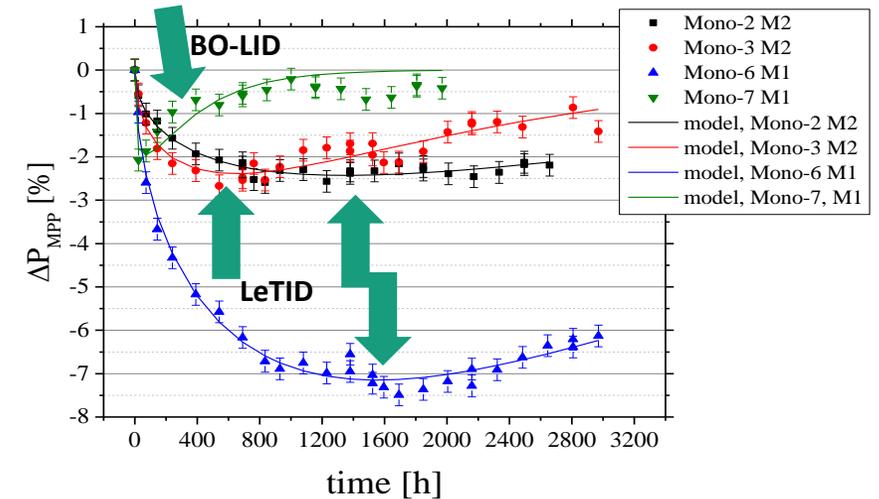
Testmethoden

LeTID-NORM: VDE-AR-E 2126-4-100-2020



- Messung M1: Vorcharakterisierung
- Messung M2: LID-Test → Abtrennung BO von LeTID
- Messung M3 bis M5: LeTID-Test

- Typischerweise 3 Module + Referenz
- LID-Test: 24h bei 25°C und CID-Methode (I=I_{sc})
- LeTID: ca. 3w, 75°C und CID-Methode mit I=2*(I_{sc}-I_{mpp})
- P/F: max. 3%



Zusammenfassung

Lichtinduzierte Degradation

- Verschiedene Typen mit unterschiedlicher Ausprägung existieren
- BO und FeB sind kurzzeitige Effekte
- LeTID bedarf erhöhten Betriebstemperaturen und langen Test bzw. Freifeldzeiten
- Über geeignete Zellprozesse kann das Ausmaß der Degradation verringert werden
- Aktuelle Tests berücksichtigen Al-BSF und PERC Zellverständnis auf p-Typ Material
- Neue Zellkonzepte und Ga-Dotierung (geringes LID zu erwarten!) werden neue Effekte zeigen

Thank you for your
attention!

