

Defektanalyse von Photovoltaik-Modulen mittels Infrarot-Thermographie

Ulrike Jahn, Claudia Buerhop, Ulrich Hoyer

- 1. Physikalische Grundlagen**
- 2. IR-Defektanalyse**
- 3. IR-Messergebnisse an PV-Komponenten**

IR-Messungen für die Fehleranalyse an Modulen:

- **berührungslose und zerstörungsfreie Prüfung im Labor und im Feld;**
- **schneller Nachweis des korrekten Betriebs nach der Installation;**
- **zur Detektion von Modulfehlern und Degradation von gealterten PV-Modulen.**

1. Physikalische Grundlagen



Thermisches Gleichgewicht

$$\varepsilon + \tau + \rho = 1$$

ε = Emissionsgrad

τ = Transmissionsgrad

ρ = Reflexionsgrad

Emissionsgrad

$$0 < \varepsilon < 1$$

gibt an, um wieviel die Abstrahlung eines realen Körpers von der eines Schwarzen Körpers abweicht.

$\varepsilon = f(\text{Wellenlänge, Temperatur, Werkstoff, Oberfläche})$

1. Physikalische Grundlagen



Richtwerte für die Praxis: (bei 8 μm Wellenlänge)

$$\epsilon = 0.85$$

PV: + Glas
- Metallrahmen

Werkstoff	ϵ
Glas	0,85
Kunststoff	~ 0,92
Metall	< 0,1

ϵ Glas (λ) = constant
 ϵ (Temp) = constant

für $\lambda = 8\text{-}12\mu\text{m}$
für $\Delta T < 100\text{K}$

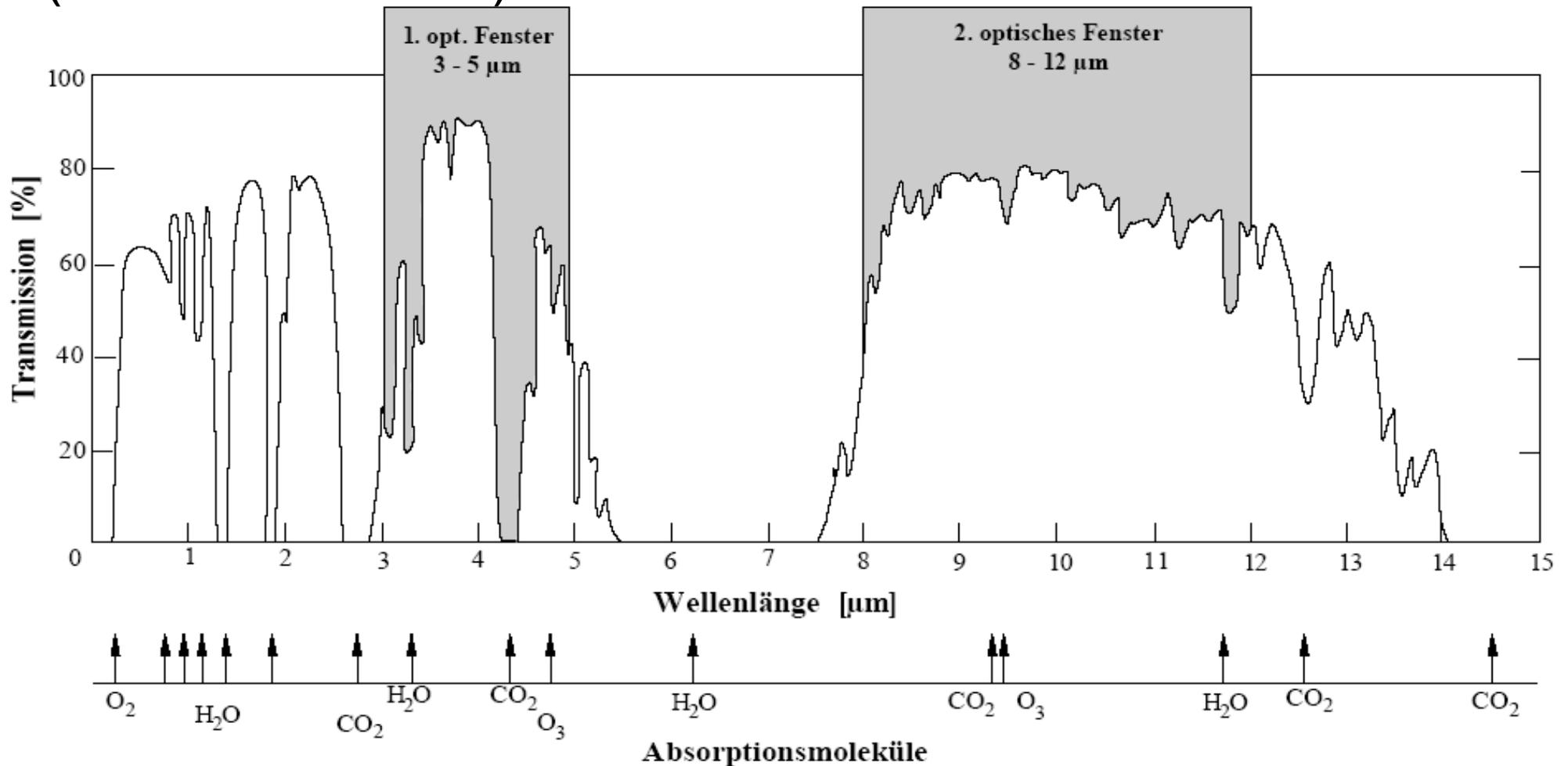
1. Physikalische Grundlagen



ZAE BAYERN

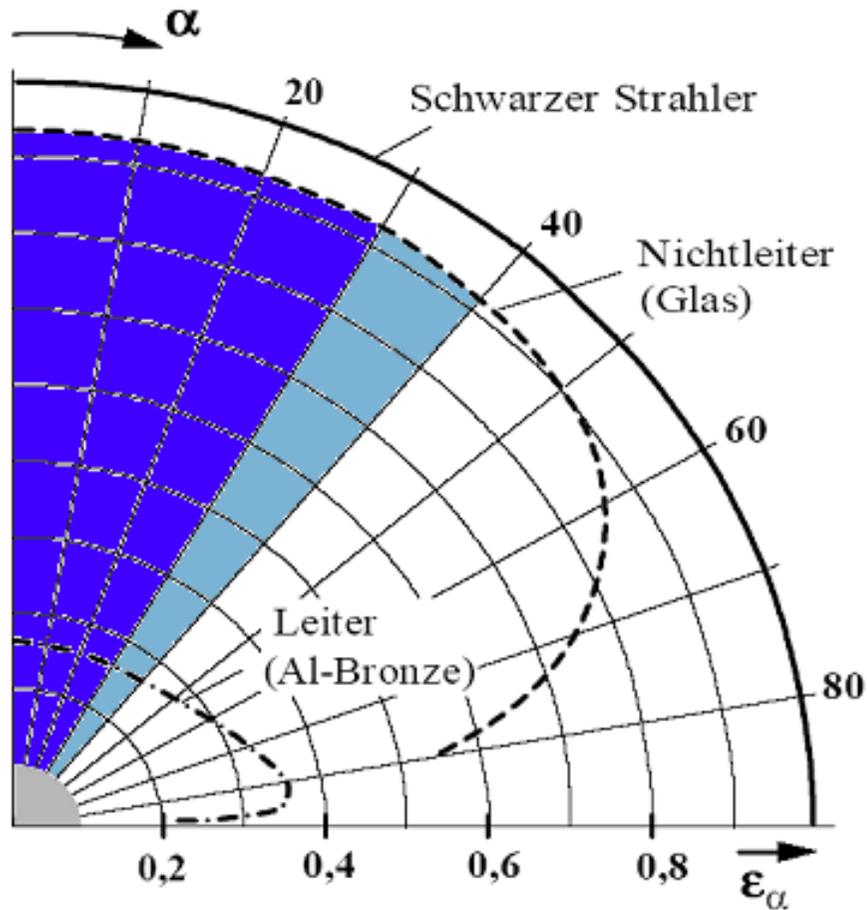
„Optische Fenster“ für die Praxis (1 km Luftstrecke)

Quelle: Sutor, Bischoff, Technische Universität Ilmenau, 2004.



1. Physikalische Grundlagen

Winkelabhängigkeit des Emissionsgrads

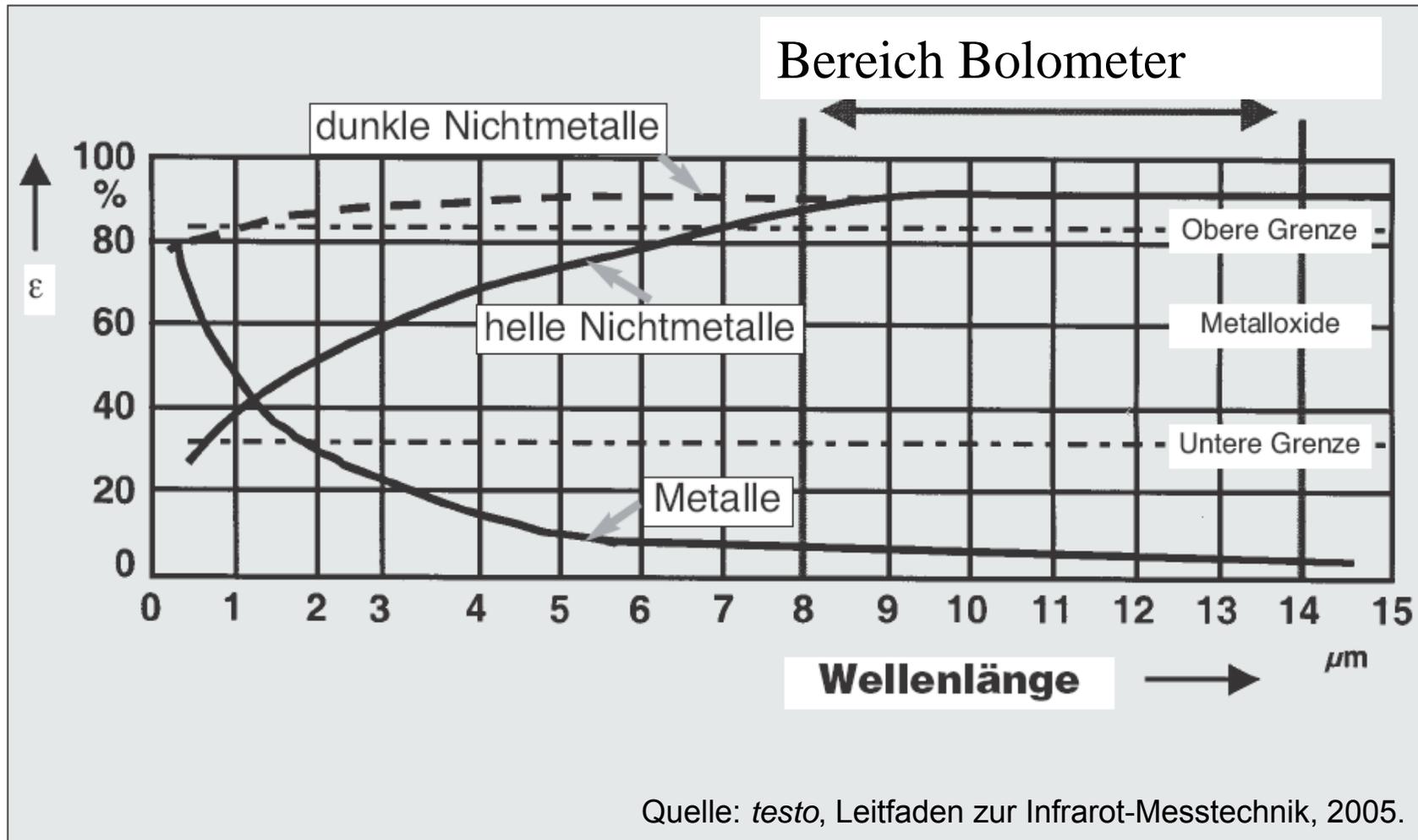


- Schwarzer Strahler
Keine Abhängigkeit
- Nichtleiter (Glas)
 $\cos \alpha$
- Leiter (Alu)
starke Abhängigkeit

Richtungsabhängigkeit der Emissionsgrads bei Leitern und Nichtleitern

Quelle: Sutor, Bischoff, Thermo-Analyse, Technische Universität Ilmenau, 2004.

1. Physikalische Grundlagen



Emissionsgrad in Abhängigkeit von der Wellenlänge für Materialgruppen

2. IR-Defektanalyse

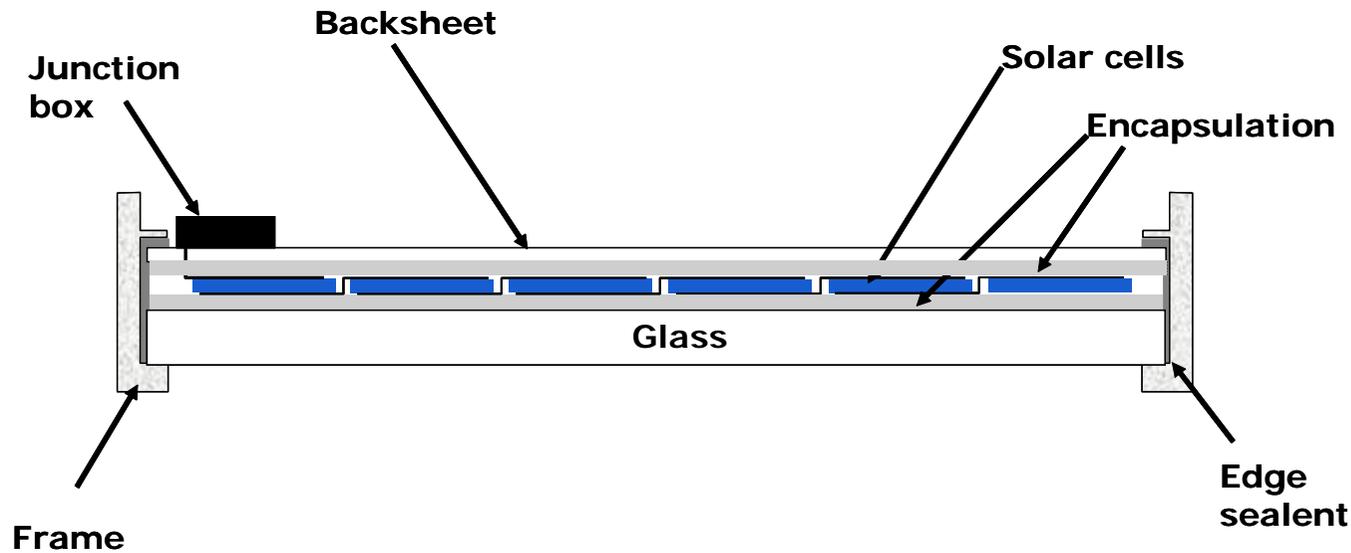


ZAE BAYERN

	<u>Typ I</u>	<u>Typ II</u>
Thermische Auflösung	0,1 K	0,01 K
Vollbildfrequenz	30/s	145/s
Pixel	76.000	110.000
Detektor	Bolometer (ungekühlt)	CMT (gekühlt)
Arbeitsbereich	8 - 14 μm	1,9 - 5,6 μm

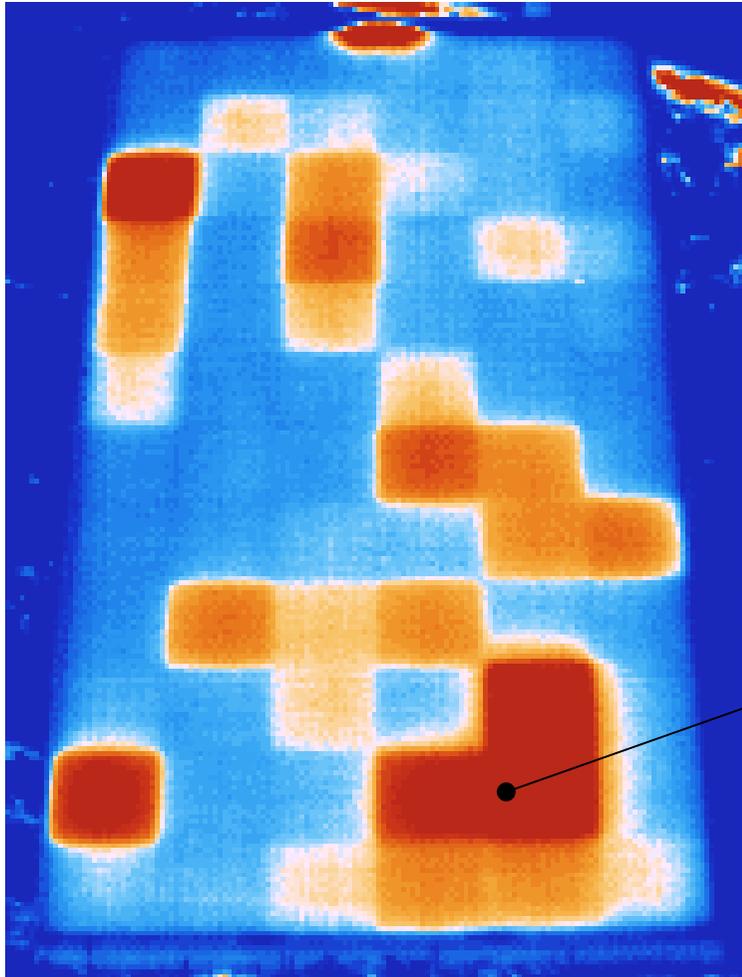


2. Defektanalyse



- **Einkapselungsmaterial: Glas, Tedlar, Bypass-Diode**
- **Haftung: Glas - Folie, Zelle - Folie**
- **Zell/Modulverbinder**
- **Solarzelle**
- **Feuchte**

2. Defektanalyse



$\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$

IR-Messungen

an PV-Modulen:

- nach Produktion
- bei Inbetriebnahme
- nach Alterung

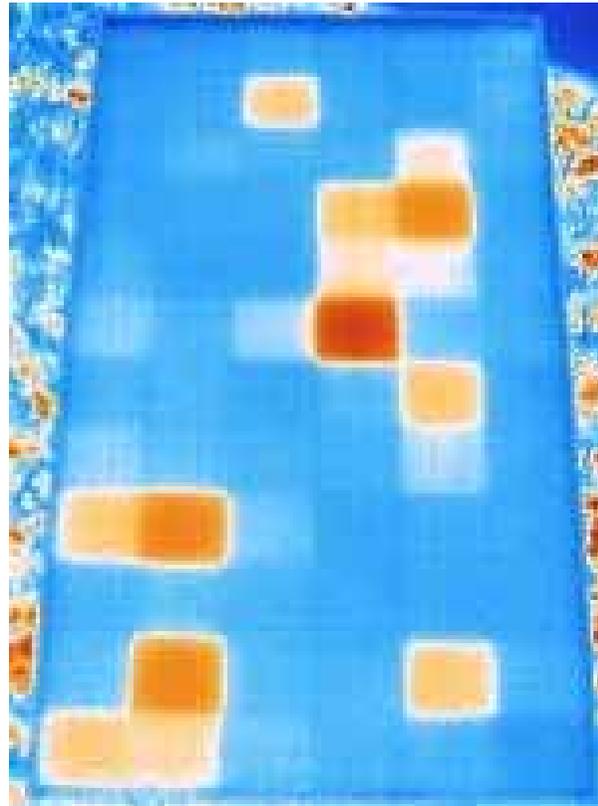
PV-Modul (2005) mit „Patchwork“ Muster

2. Defektanalyse

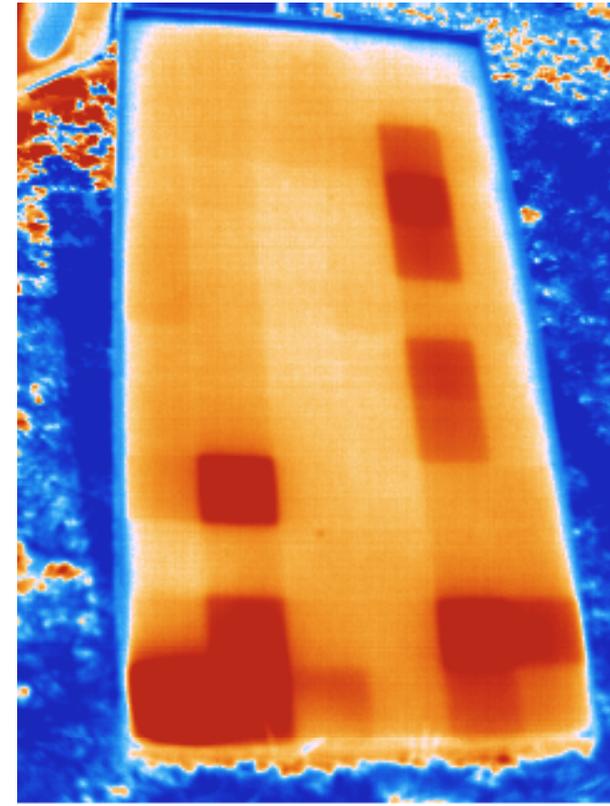
Leerlauf



Kurzschluss

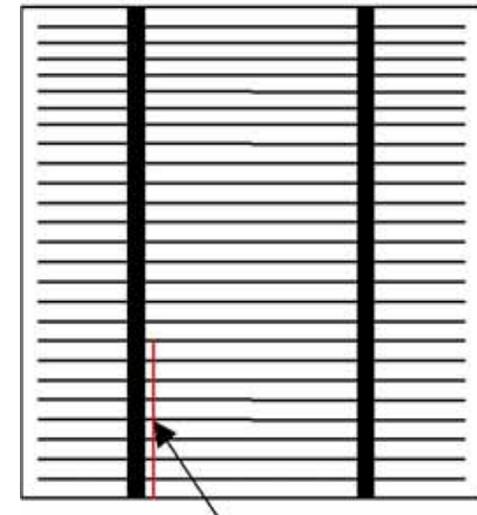
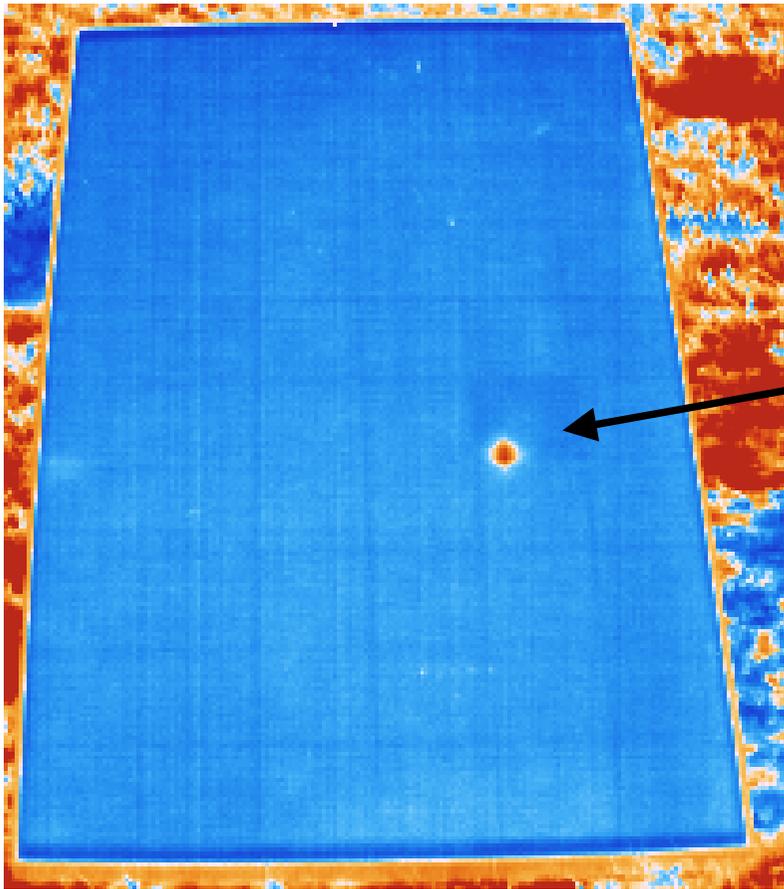


Last



Outdoor-Messung: Bei $>700 \text{ W/m}^2$

3. Hot Spot – Riss in Solarzelle



- Riss im Wafer
- Metallisierung
- Gebrochene Zelle

3. Kontaktfinger-Unterbrechungen

IR-Messung: Topographie



← 156mm →

Frequenz: 4Hz

Messdauer: 5000 Perioden

Bias: 6A

Lock-in-IR-Messung

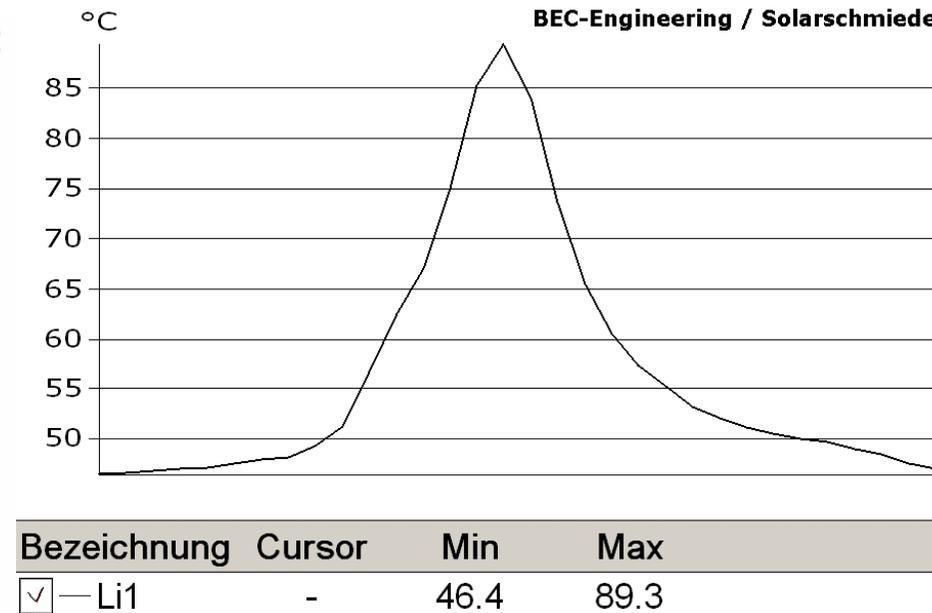
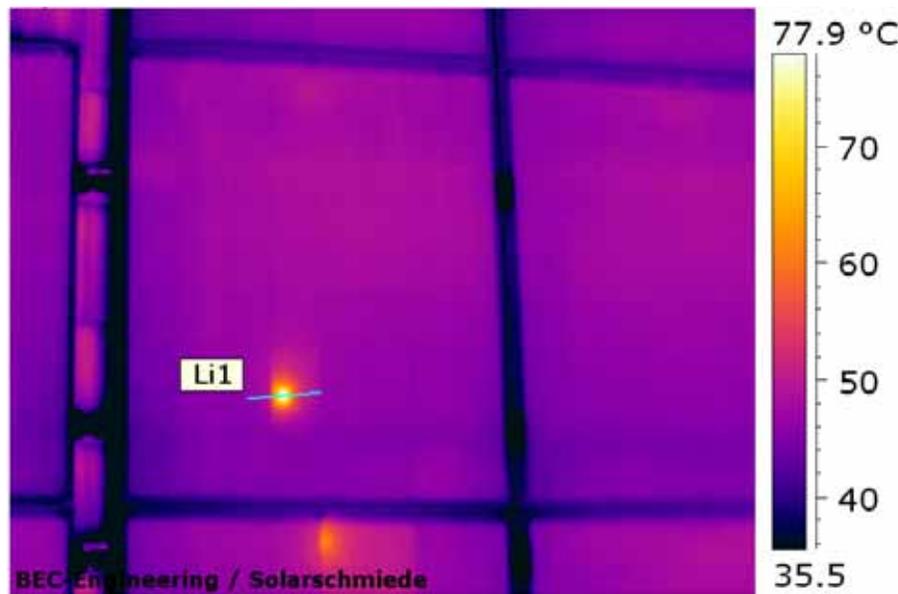


Frequenz: 4Hz

Messdauer: 5000 Perioden

Bias: 6A

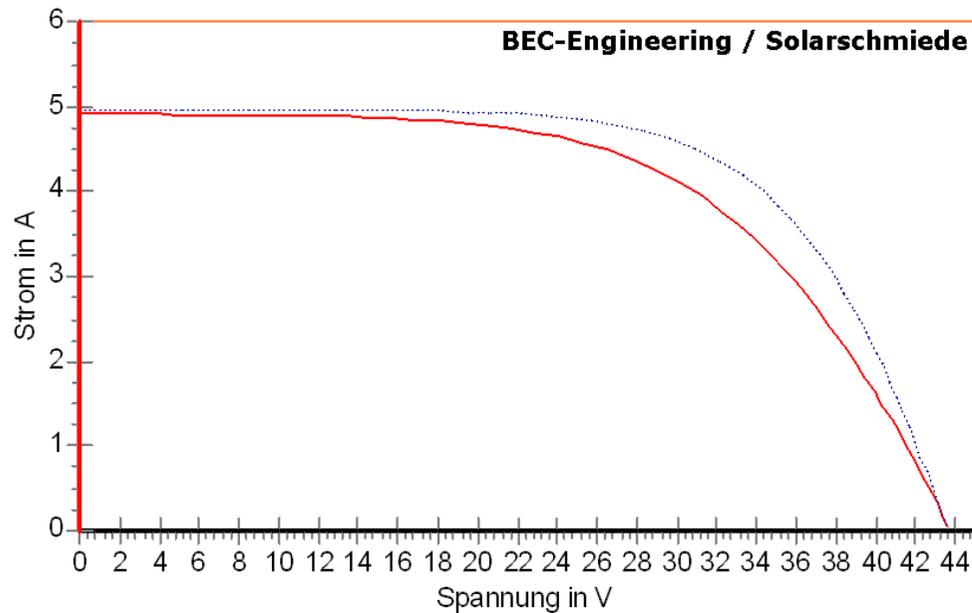
3. Hot Spot - Zelldefekt



Quelle: BEC-Engineering / Solarschmiede.

**PV-Anlage mit polykristallinen Modulen (2004):
Hot Spot: $\Delta T > 40^\circ\text{C}$**

3. Hot Spots

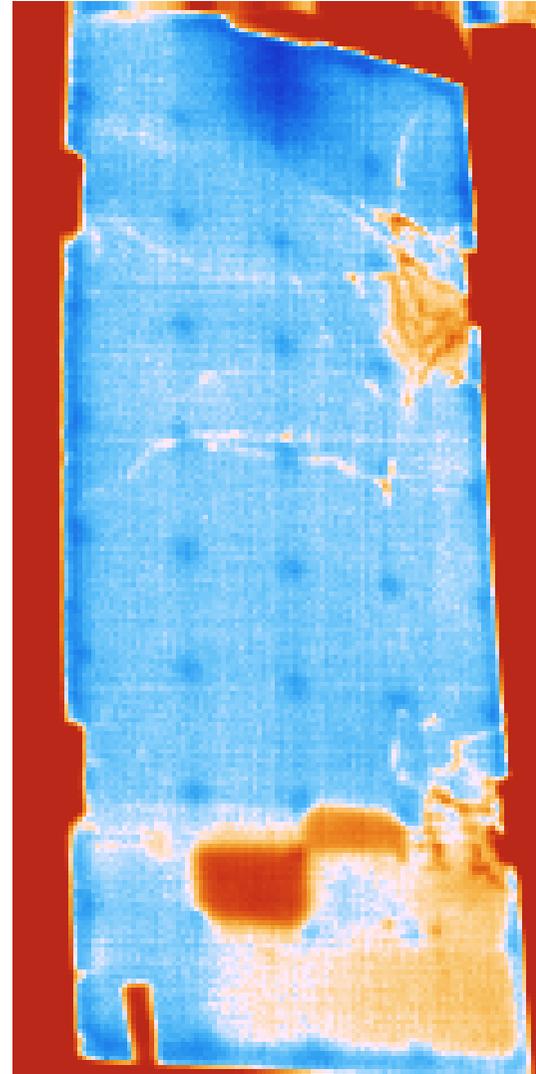
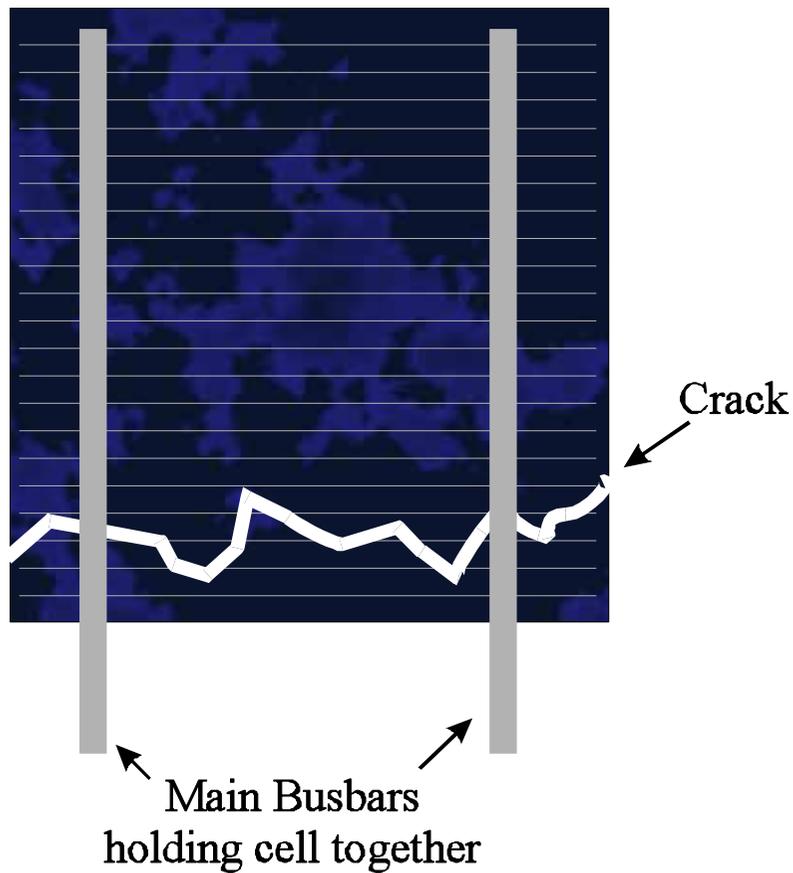


	Referenz-Modul	Hot Spot-Modul
I_{sc} [A]	5,0	4,9
U_{oc} [V]	44	44
I_{pmax} [A]	4,4	4,1
U_{pmax} [V]	32	30
R_s [Ω]	1,8	4,0
P_{pk} [W]	141	123

Innenwiderstand steigt: +120%

Nennleistung und FF des Moduls sinkt : -12%

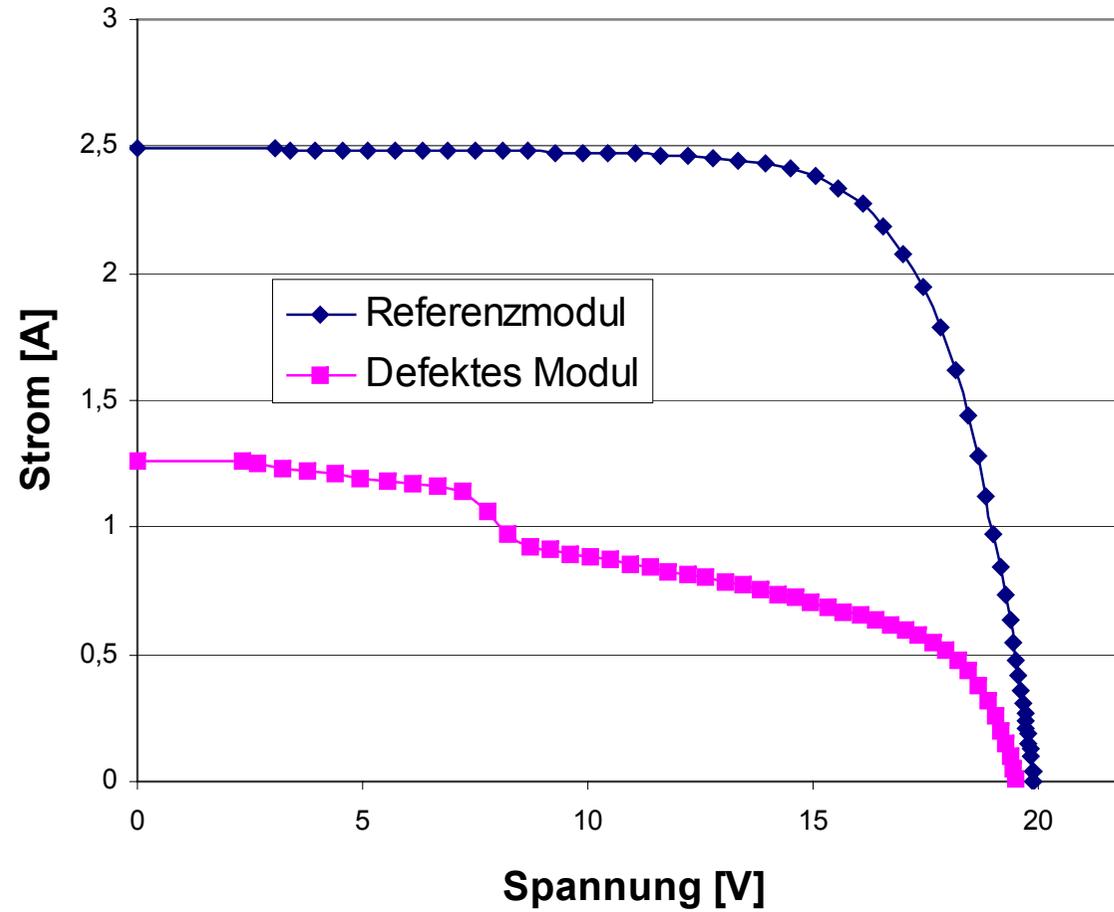
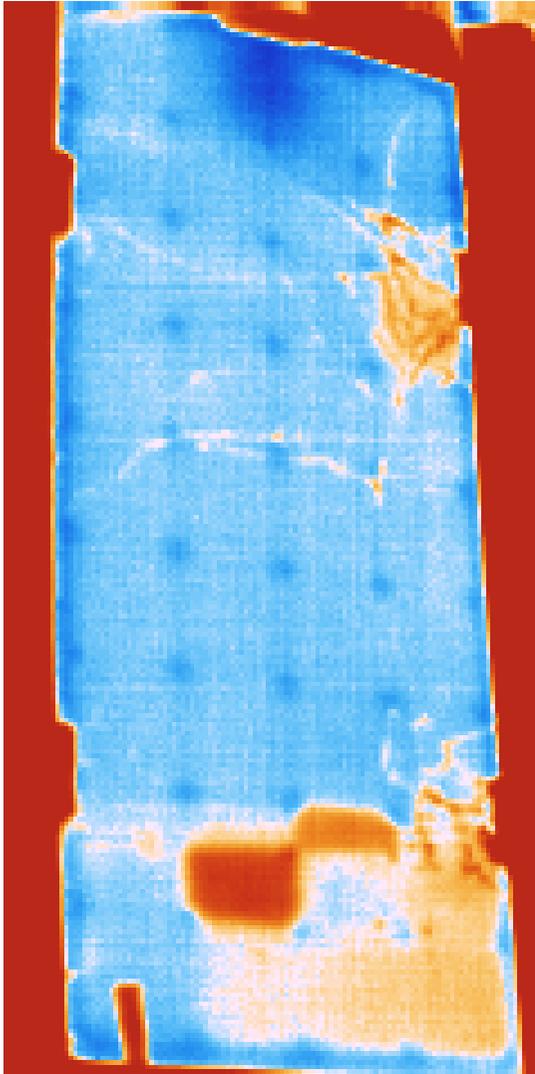
3. Zellbruch



Oben:
- Glasbruch
- kein Zellbruch

Unten:
- Glasbruch
- Zellbruch

3. Zellbruch

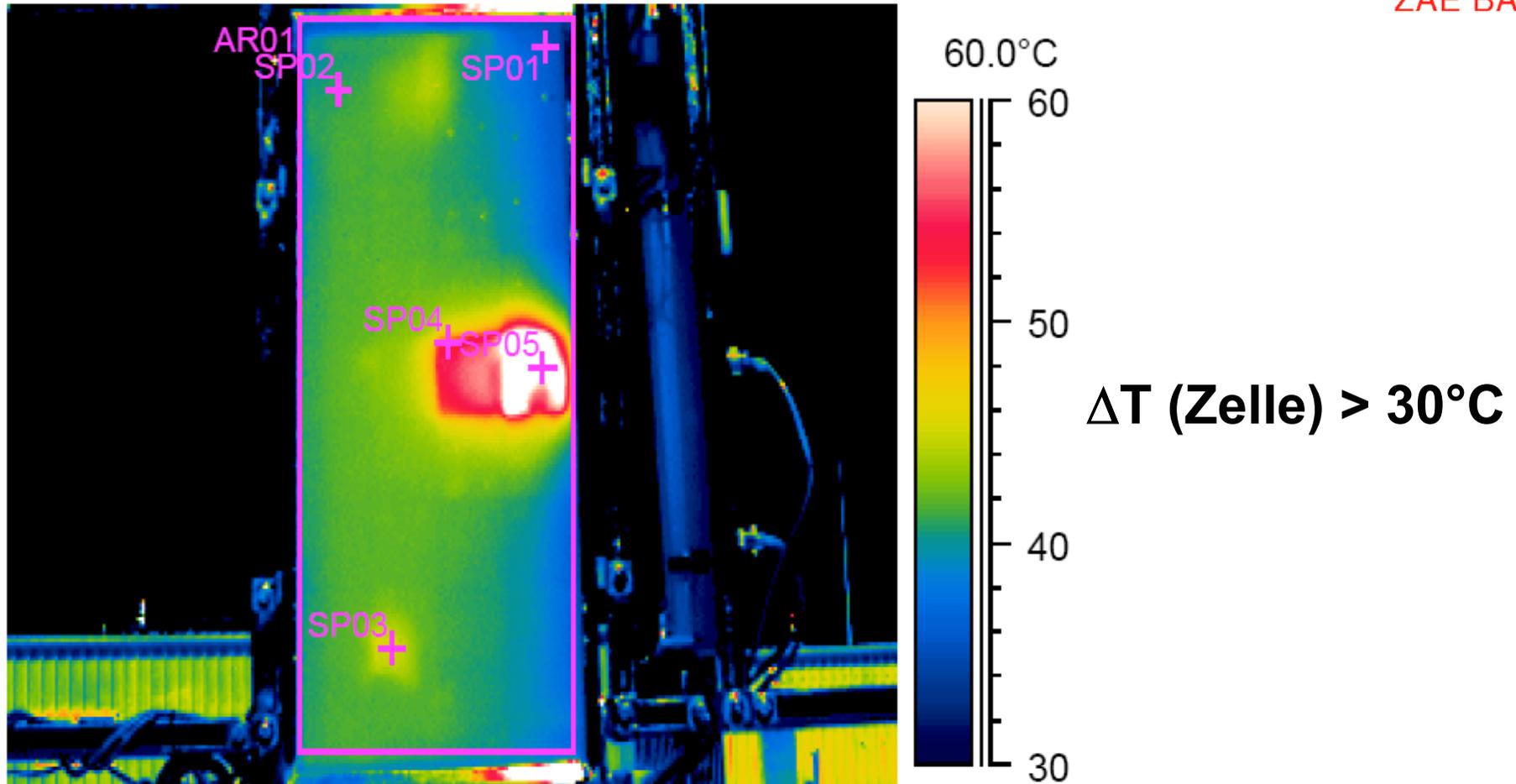


$G_1 = 781 \text{ W/m}^2$

$T_{\text{mod}} = 41,2^\circ\text{C}$

$FF = 0,42$

3. Haftungsverlust



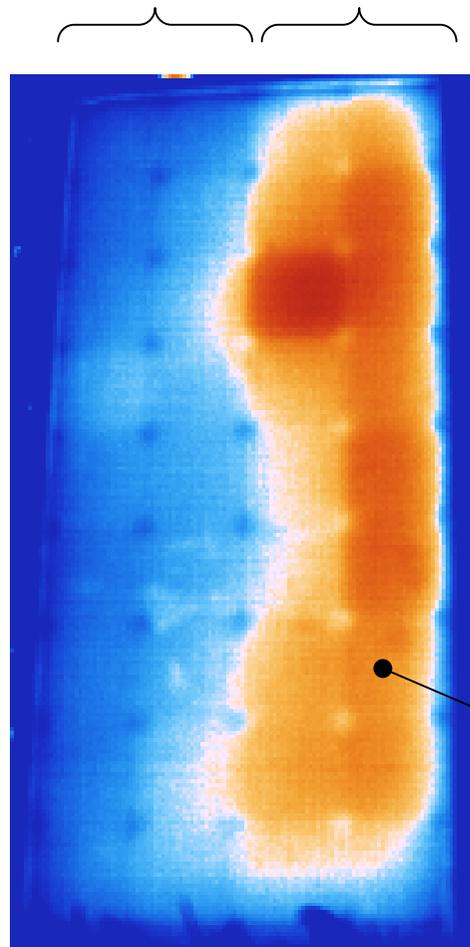
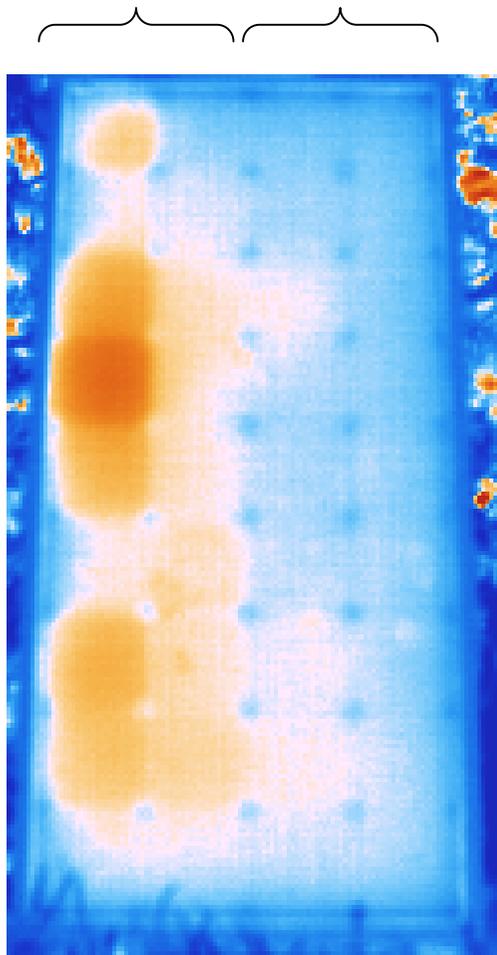
Quelle: Quintana et. al., 29th IEEE, 2002.

Kurzgeschlossenes Modul mit Delamination an einer Zelle

3. Defekte Bypass-Diode

Kurz-
schluss Last

Last Kurz-
schluss



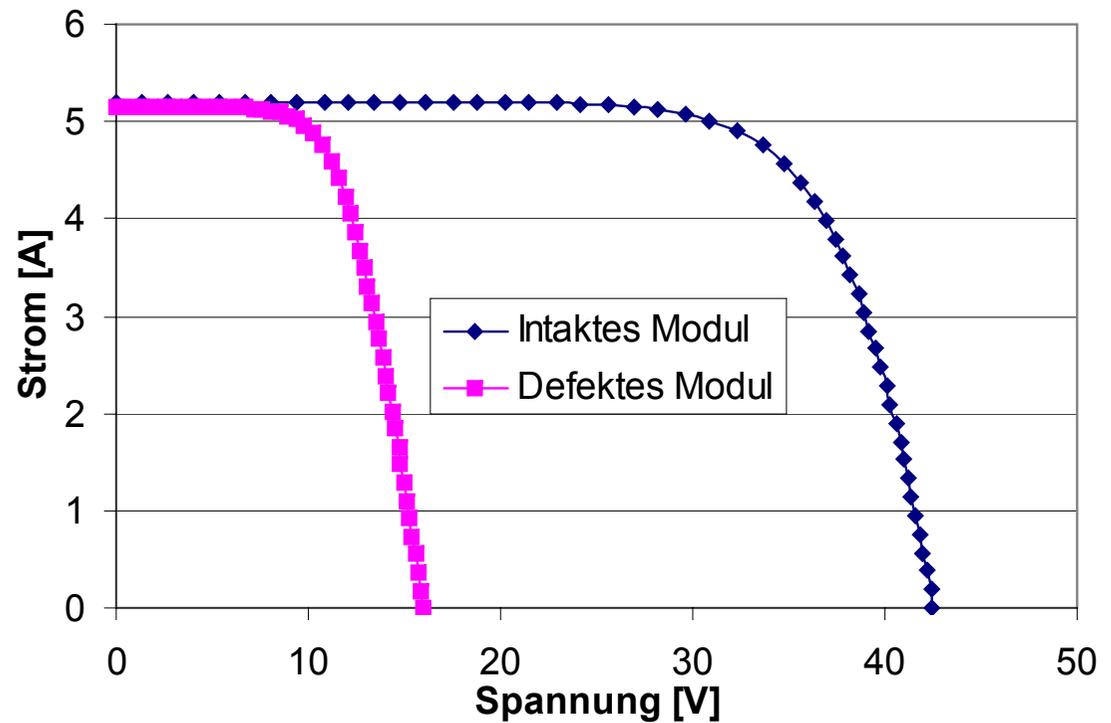
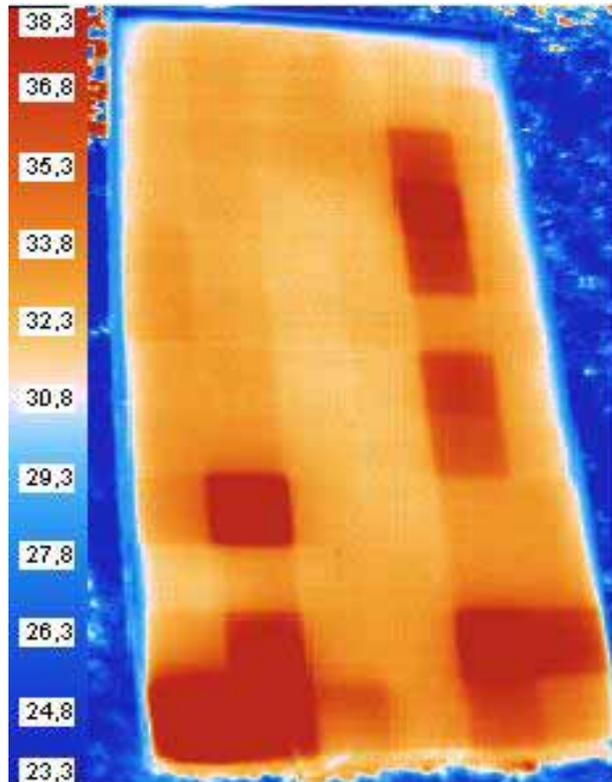
Kurzschluss von 18 Zellen

- erhöhte Temperatur
- reduzierte Spannung
- reduzierte Leistung

$\Delta T = 7^\circ\text{C}$

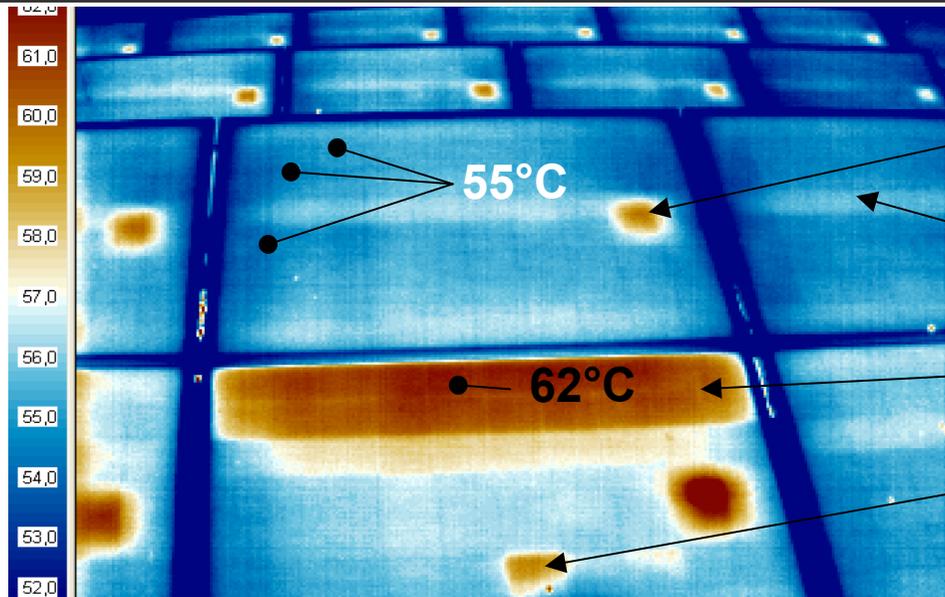
Unter Last gemessen

3. Defekte Bypass-Diode



Messung bei STC	51 W	$I_{sc} = 4,9 \text{ A}$	$U_{oc} = 15 \text{ V}$	1/3 aktiv
Datenblatt (STC)	160 W	$I_{sc} = 5,1 \text{ A}$	$U_{oc} = 44 \text{ V}$	

3. Defekter Substring



- Anschlussdosen
- Aufständerung + Kabel
- Defekter Substring
- Defekte Einzelzelle

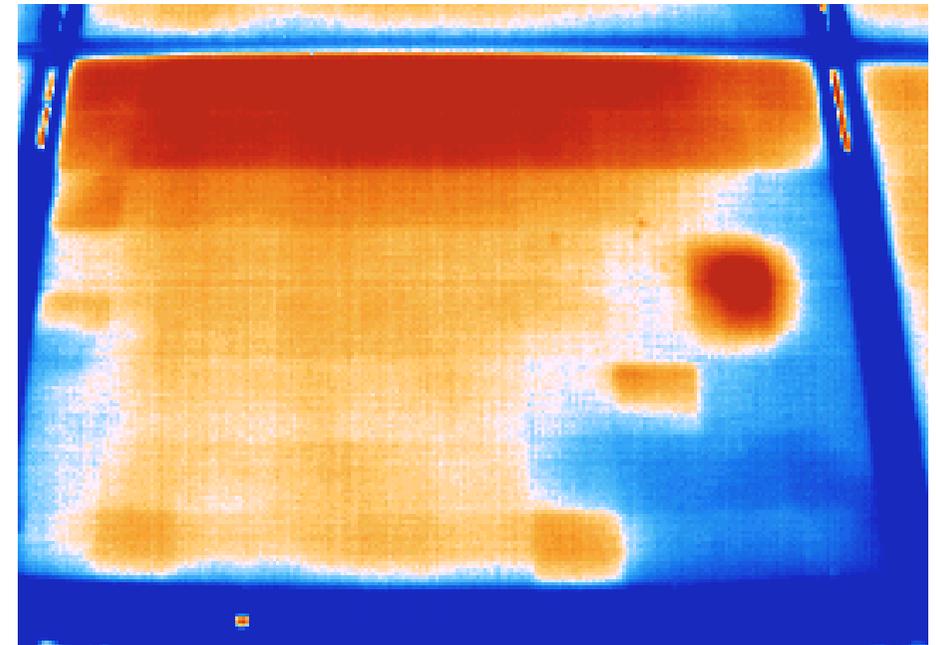
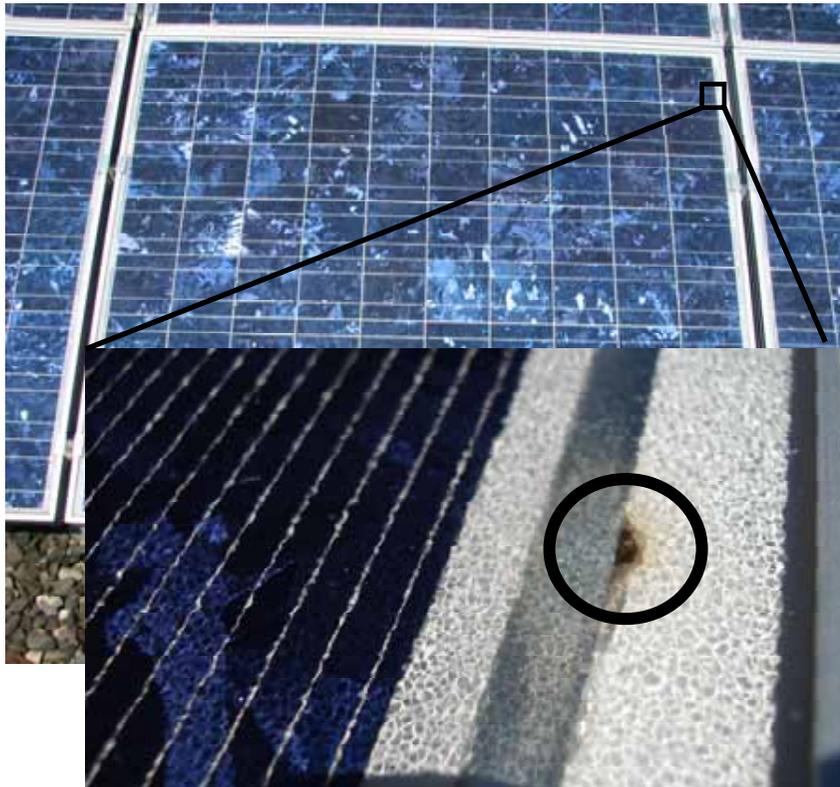


Unter Beleuchtung gemessen

Schule Erlangen

IR-Aufnahme mit MIDAS IR-Kamera bei 8 µm, 320x240 Pixel

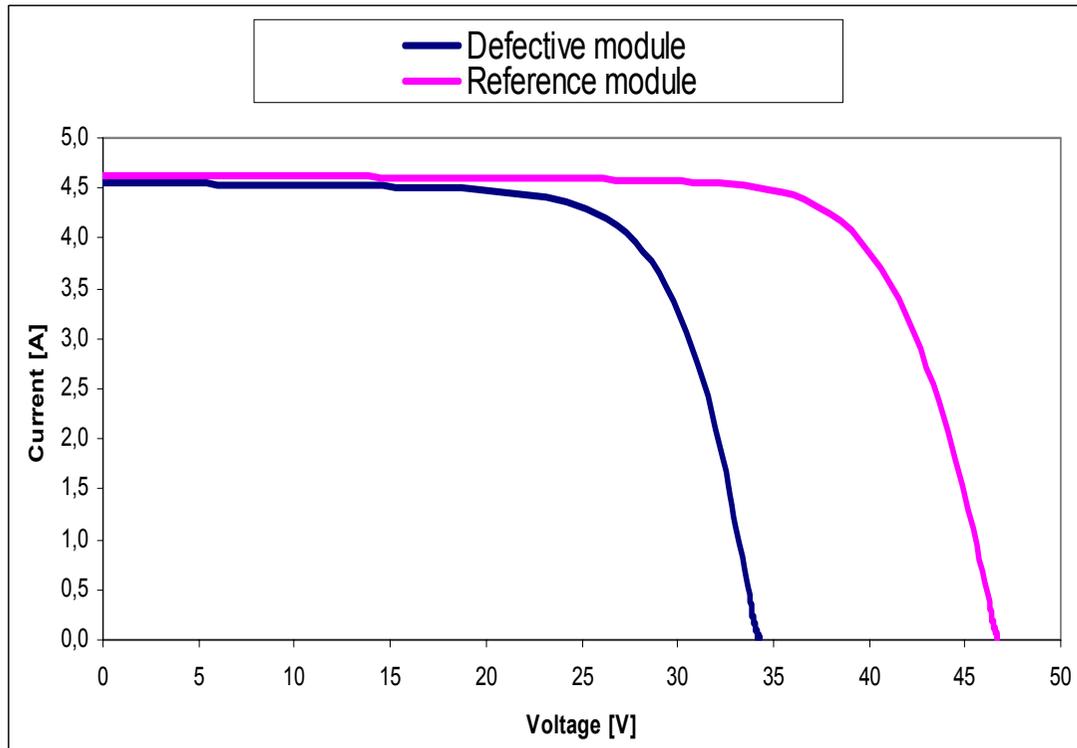
3. Defekter Verbinder



August 2007

Defekte Strangherausführung zwischen 2 Laminaten

3. Defekter Substring



	Defektes Modul	Referenz-modul
I_{sc} [A]	4.55	4.63
U_{oc} [V]	34.2	46.7
I_{pmax} [A]	4.1	4.3
U_{pmax} [V]	26.9	37.4
H_i [W/m ²]	890	915
P_{pk} [W]	128	183

Leerlaufspannung:

- 27%

Leistung des kurzgeschlossenen Moduls:

- 30%

- **IR auffällige Module (u.a. Zellrisse) sind nicht immer elektrisch relevant.**
- **Hot Spots:**
 - **Parallelwiderstand: Shunts im Emitter, Feuchteintrag**
 - **Serienwiderstand: Verbinder, Zellrisse**
- **Substringausfall bedeutet Spannungsverlust (U_{oc}): mit IR gut detektierbar.**
- **Heiße Zellen resultieren aus Zell-Mismatch (Patchwork).**

- **IR-Messungen sind geeignet für die effektive Fehlerdetektion von Defekten in Modulen und sind gut korreliert mit elektrischen Messungen.**
- **IR detektiert größere Leistungsverluste (>20%), die häufig mit FF-Verlusten und dem Anstieg des Serienwiderstands verbunden sind.**
- **Weitere Untersuchungen an im Feld gealterten Modulen müssen durchgeführt werden, um die Degradationsmechanismen besser zu verstehen.**



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!