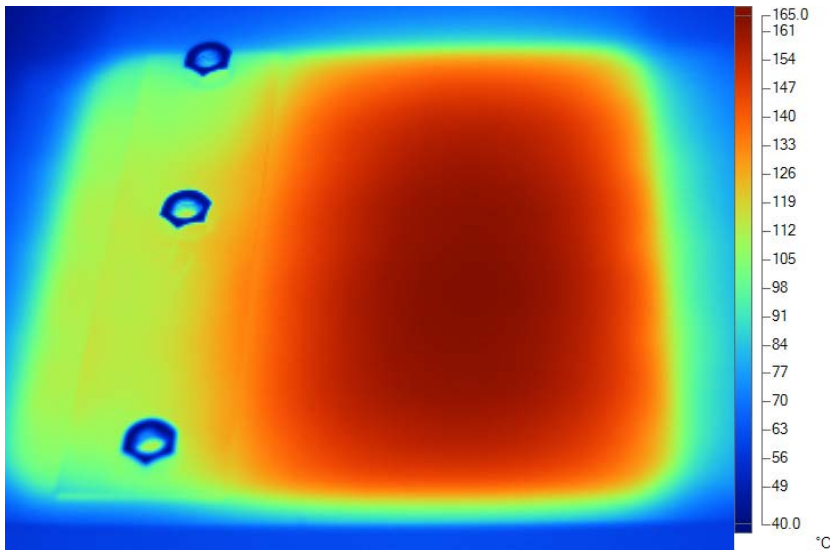




Einfluss inhomogener Beleuchtung auf Solarmodule mit Modulleistung über 400 W_p

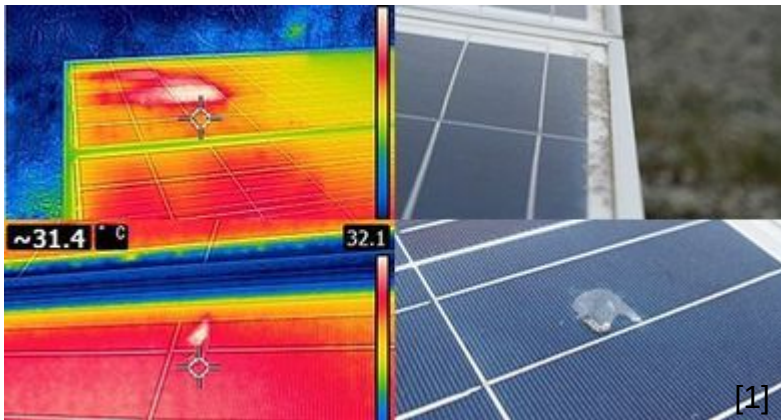
Robert Witteck

Institut für Solarenergieforschung in Hameln
(ISFH)

Mismatch in PV-Modulen



- Verschattung oder Zellcracks führen zu Strom-Mismatch
- Zelle mit Mismatch dissipiert Leistung und wird heiß



Mismatch in PV-Modulen

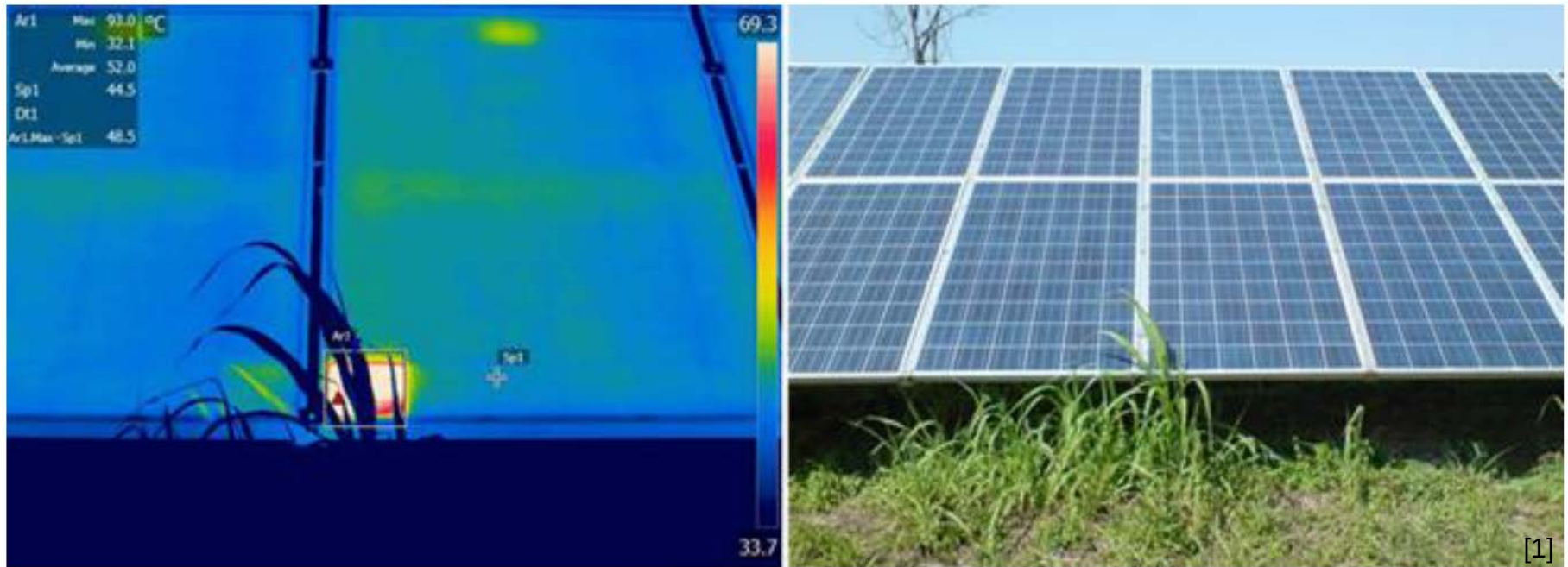
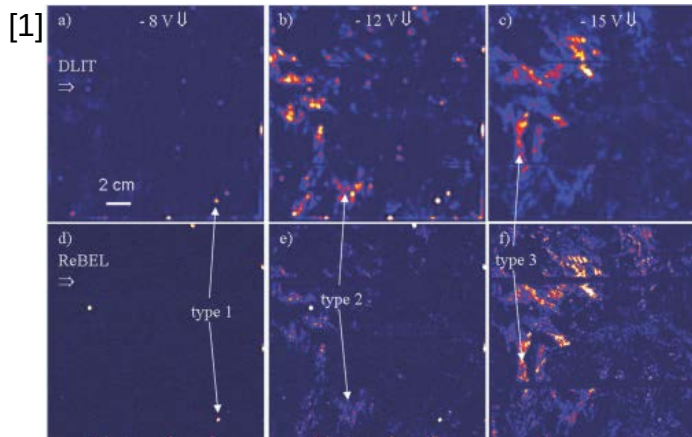
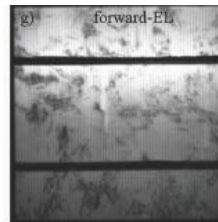
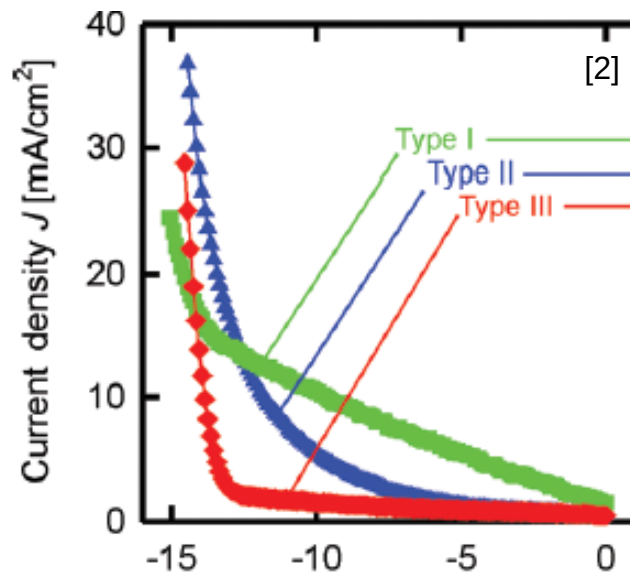


Figure 2-14: PV module shows overheated cells due to shading by plants.

Sperrspannung von Si Solarzellen

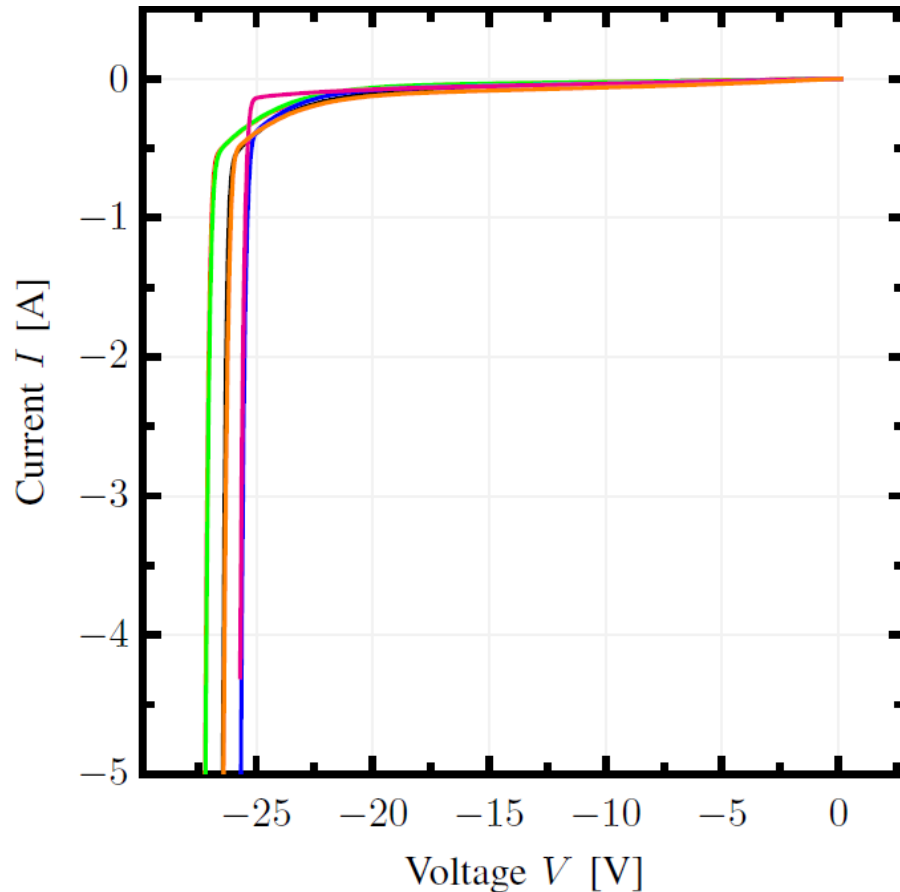


- Multikristalline Silizium (Si) Solarzellen haben geringe Sperrspannung
→ Hot spot Problem



[1] O. Breitenstein, et al. „Review on Infrared and Electroluminescence Imaging for PV Field Applications”, 2018

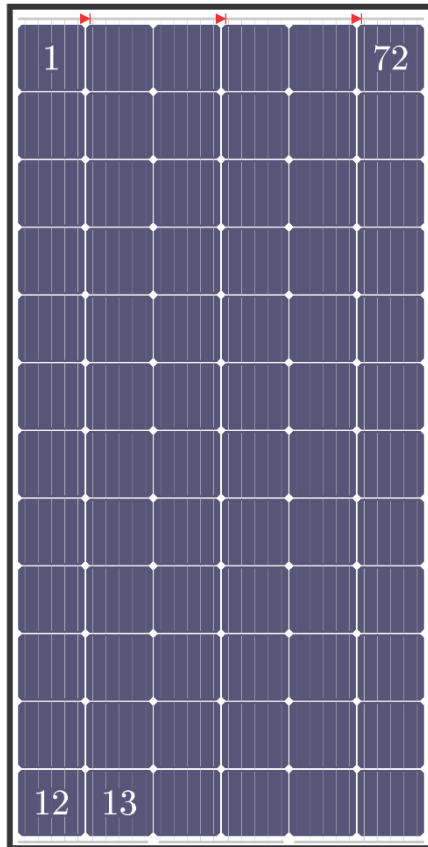
[2] O. Breitenstein, et al. „Understanding junction breakdown in multicrystalline solar cells”, 2011



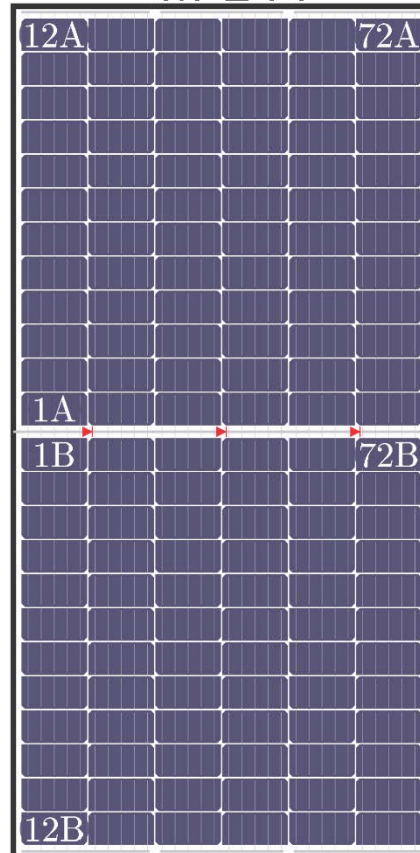
- Multikristalline Silizium (Si) Solarzellen haben geringe Sperrspannung
→ Hot spot Problem
- PV-Markt heute dominiert von monokristallinen Si Solarzellen
→ 60% und Tendenz steigend [1]
- Monokristalline Si Solarzellen sperren homogen bis -20 V
→ kein lokaler Durchbruch
→ homogene Leistungsdissipation

Umfrage und Fragen vom Publikum

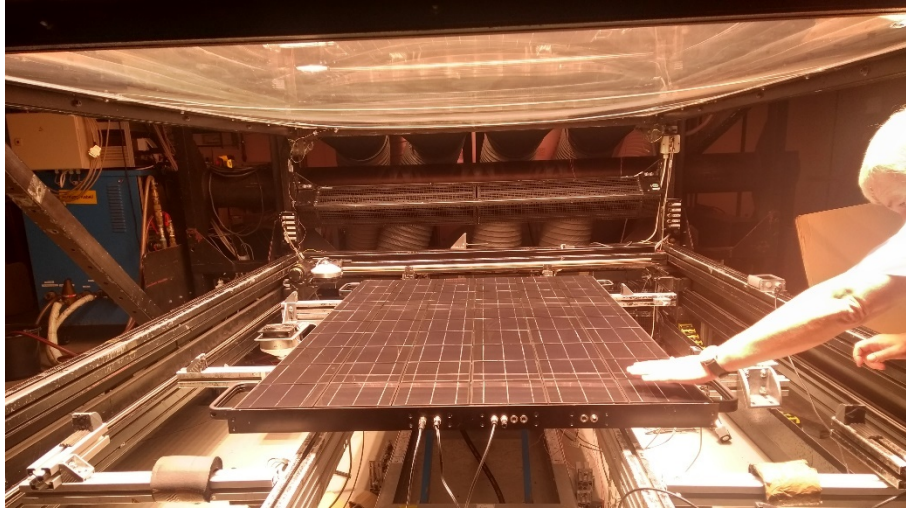
M-72



M-144



- Vollzellen M-72
→ $P_{MPP} = 375 W_p$
- Halbzellen M-144
→ $P_{MPP} = 389 W_p$
- Beide Module mit monokristallinen Si Solarzellen
- Test nach IEC 61215-2:2019 MQT09 → Ungünstigster Verschattungsfall für einzelne Zellen im Modul

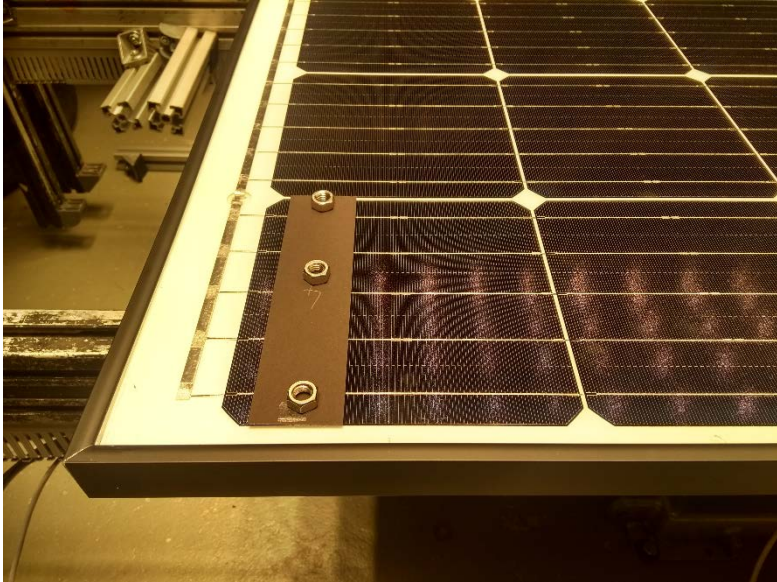


- Steady-State Sonnensimulator
- Homogenität Bestrahlungsstärke
→ 3.5%
→ Median = 922 W/m²
- Monitoring während des Tests mit zwei Pyranometer
- Gekühlter Himmel → $T_{\text{sky}} = 23^{\circ}\text{C}$
- Rückseitenkonvektion für Modultemperatur $(50 \pm 10)^{\circ}\text{C}$

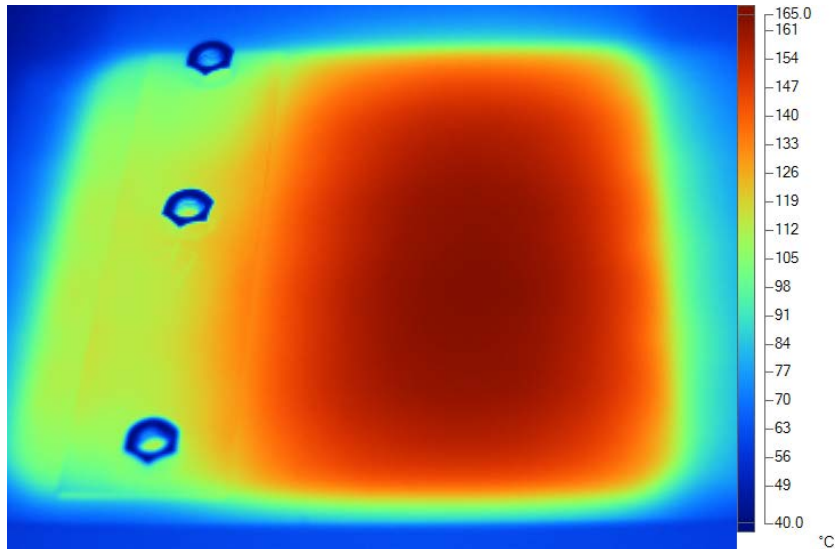
Bestrahlungsstärke [W/m²]

938	933	917	928	918	918	917	915	911	886	910	940
913	918	910	917	919	933	926	919	923	918	915	920
934	930	920	921	933	936	944	926	912	922	912	911
950	932	916	932	943	946	943	934	937	927	908	931
925	915	891	918	935	940	931	921	931	915	910	922
923	916	904	931	926	936	941	938	950	946	922	933

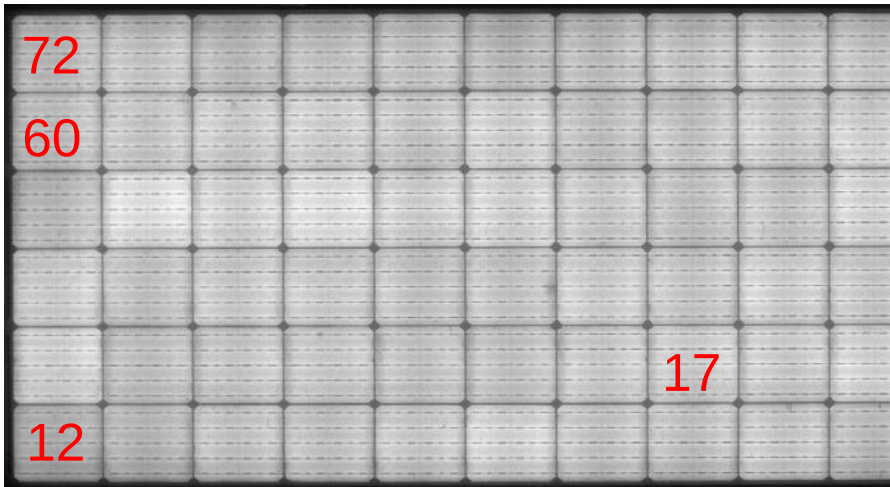
Modul M-72 im Hotspotttest



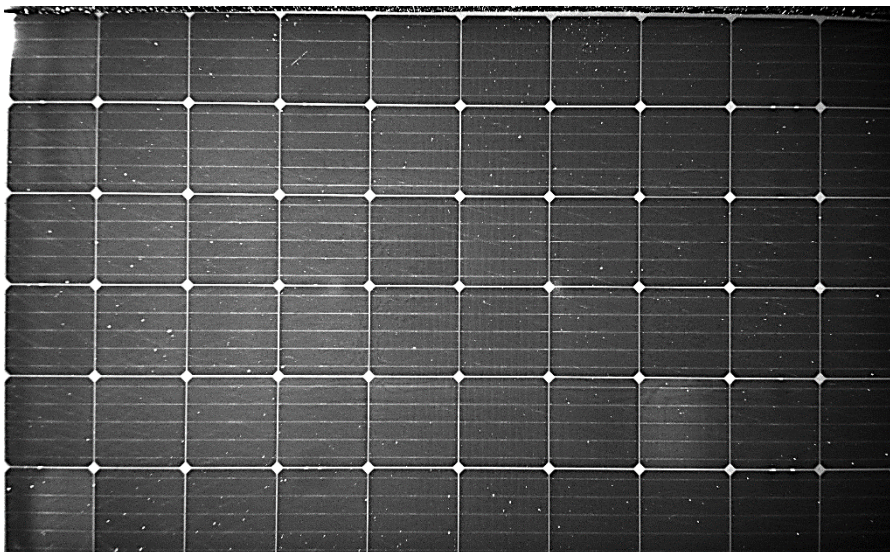
- Verschattung von Zelle 12 zeigte höchste Temperatur → 165 °C
- Alle Zellen erwärmen sich homogen und sind im Steady-State innerhalb 1h

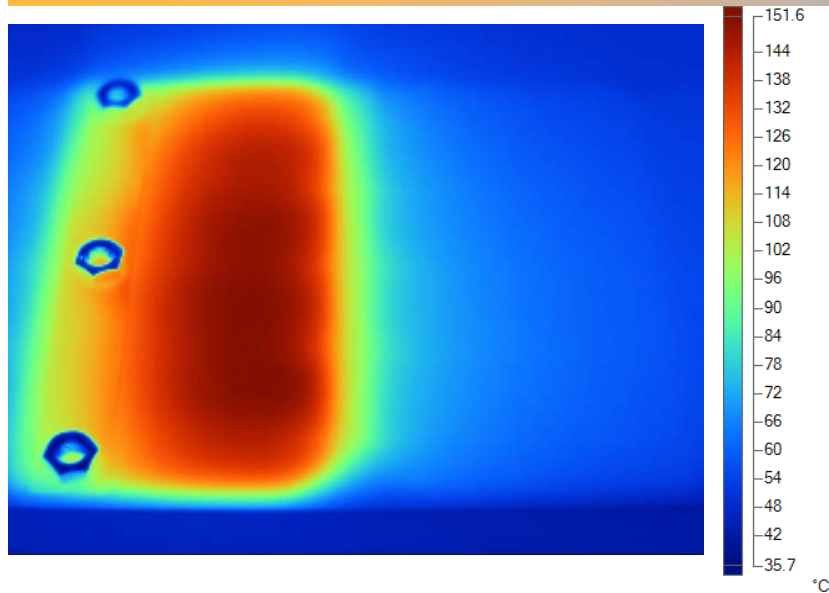


Modul	M-72	M-72	M-72	M-72
Zelle	12	17	60	72
T_{MAX} [°C]	164	161	141	151



- Verschattung von Zelle 12 zeigte höchste Temperatur → 165 °C
- Alle Zellen erwärmen sich homogen und sind im Steady-State innerhalb 1h
- UV-Floureszenzaufnahme zeigt Schädigung des Einkapselungsmaterials [1]

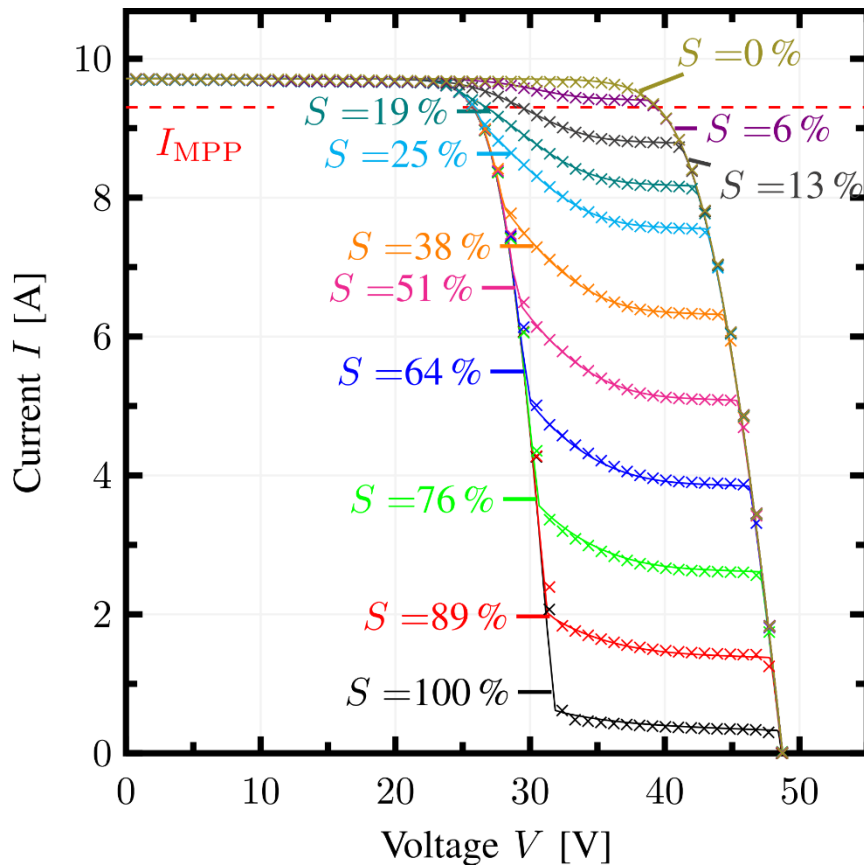




- Zelle 1A heißeste Zelle in M-144
→ $T_{\max} = 151^{\circ}\text{C}$
- ➔ Vorteil für Halbzellenmodul gegenüber Vollzellenmodul
- ➔ Verhältnis von Fläche in der Leistung dissipiert wird zu Umfang entscheidend = Kühlung durch Zellrand

Modul	M-72	M-72	M-72	M-72	M-144
Zelle	12	17	60	72	1A
$T_{\max}$ [°C]	164	161	141	151	151

Umfrage und Fragen vom Publikum



- Basierend auf 2 Dioden-Modell und Durchbruchmodell von Ruiz *et al.* [1]
- Parameter von $I(V)$ Kennlinien von 100 bifazialen PERC+
- Verifikation an $I(V)$ Kennlinien Module M-72 und M-144

Thermisches Modell: $q_{\text{cell}} = -k \nabla^2 T + q_{\text{rad}} + q_{\text{con}}$

Wärmestrahlung: $q_{\text{rad}} = \epsilon_s \sigma (T^4 - T_s^4)$

Konvektion: $q_{\text{con}} = h (T - T_{\text{amb}})$ [2]

$$h_{\text{natural}} = \frac{k}{L} 0.15 Ra^{\frac{1}{3}}$$

$$h_{\text{force}} = 2 \frac{k}{L} \frac{0.3387 Pr^{\frac{1}{3}} Re^{\frac{1}{2}}}{\left[1 + \left(\frac{0.0468}{Pr}\right)\right]^{\frac{1}{4}}}$$

[1] TABLE V
PARAMETERS FOR THE THERMAL MODEL

Component	thickness [mm]	k [W m ⁻¹ K ⁻¹]	ϵ_s
Glass	3	1.8	0.9
EVA	0.45	0.32	-
Silicon	0.18	149	-
Polymer	0.3	0.56	0.9
Backsheet	30	237	-
Al frame			

Dissipierte Leistung in
verschatteter Zelle aus
elektrischem Modell



Numerische Simulation
(FEM) thermisches Modell

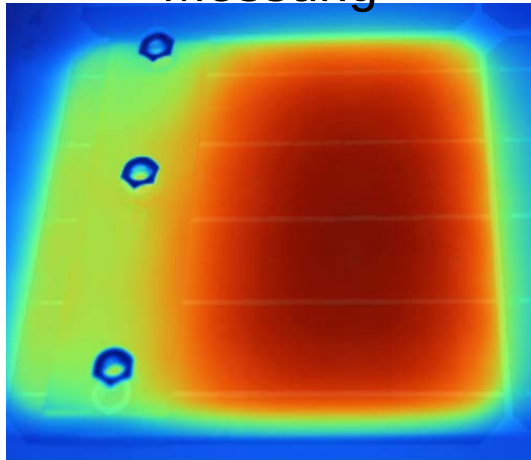


Modul und Zelltemperatur

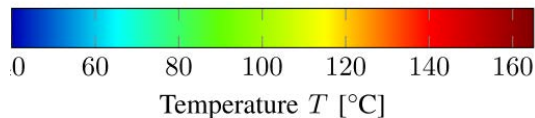
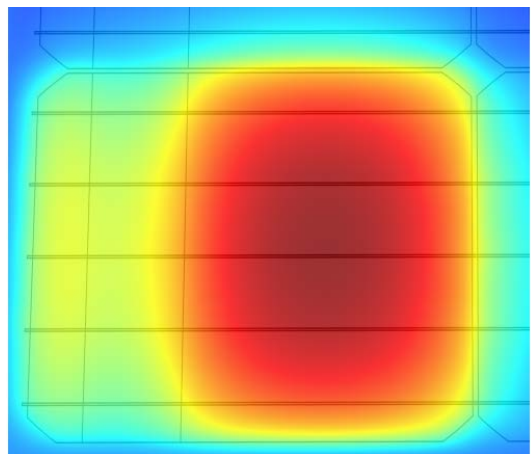


Prognose für neue
Waferformat und
steigende Modulleistungen

Messung



Simulation



Dissipierte Leistung in
verschatteter Zelle aus
elektrischem Modell



Numerische Simulation
(FEM) thermisches Modell



Modul und Zelltemperatur

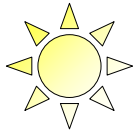


Prognose für neue
Waferformat und
steigende Modulleistungen

Szenario	Waferformat	Zellfläche [cm ²]	Zellen pro String/Modul	P_{MPP} [W]	P_d [W]	T_{MAX} [°C]	T_z [°C]
1	M3	125	12 / 144	389	52	152	159
2	M3	125	12 / 144	397	58	163	171
3	M4	129	12 / 144	411	60	163	171
4	M6	137	12 / 144	436	64	165	173
5	M12	221	10 / 100	487	82	151	158
6	M12	147	15 / 150	487	86	176	186

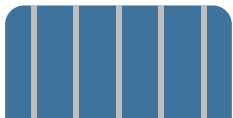
Szenario	Waferformat	Zellfläche [cm ²]	Zellen pro String/Modul	P_{MPP} [W]	P_d [W]	T_{MAX} [°C]	T_z [°C]
1	M3	125	12 / 144	389	52	152	159
2	M3	125	12 / 144	397	58	163	171
3	M4	129	12 / 144	411	60	163	171
4	M6	137	12 / 144	436	64	165	173
5	M12	221	10 / 100	487	82	151	158
6	M12	147	15 / 150	487	86	176	186

910 W/m²



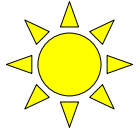
M3

15.9x15.9 cm
Ø 21.0 cm



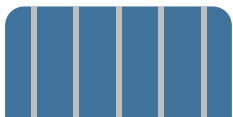
Szenario	Waferformat	Zellfläche [cm ²]	Zellen pro String/Modul	P_{MPP} [W]	P_d [W]	T_{MAX} [°C]	T_z [°C]
1	M3	125	12 / 144	389	52	152	159
2	M3	125	12 / 144	397	58	163	171
3	M4	129	12 / 144	411	60	163	171
4	M6	137	12 / 144	436	64	165	173
5	M12	221	10 / 100	487	82	151	158
6	M12	147	15 / 150	487	86	176	186

1000 W/m²

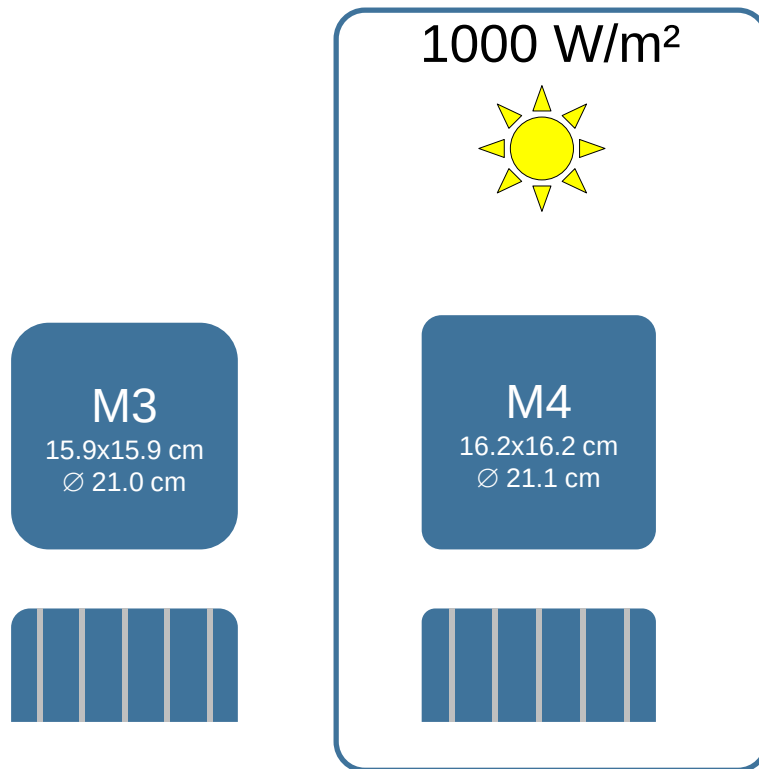


M3

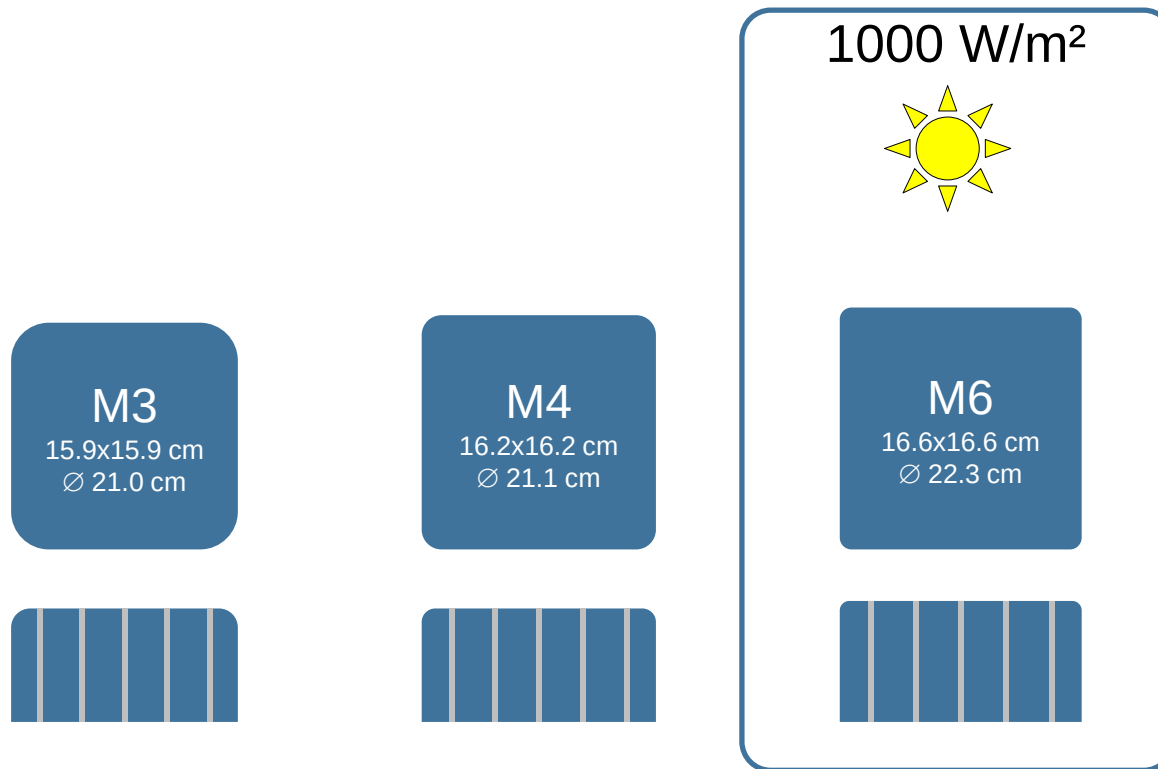
15.9x15.9 cm
Ø 21.0 cm



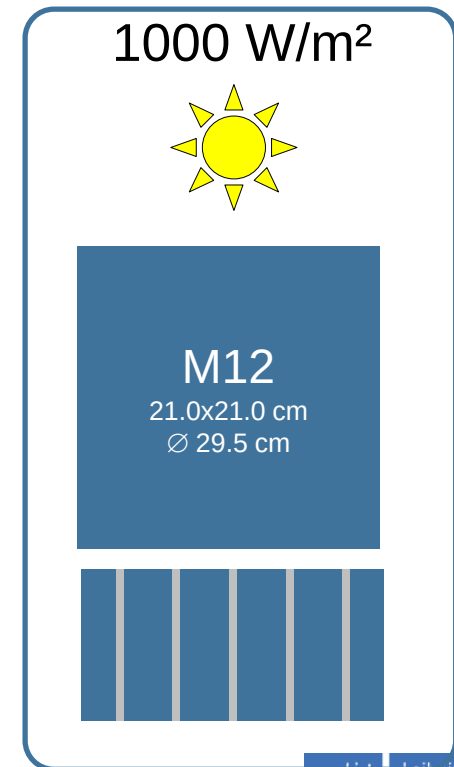
Szenario	Waferformat	Zellfläche [cm ²]	Zellen pro String/Modul	P_{MPP} [W]	P_d [W]	T_{MAX} [°C]	T_z [°C]
1	M3	125	12 / 144	389	52	152	159
2	M3	125	12 / 144	397	58	163	171
3	M4	129	12 / 144	411	60	163	171
4	M6	137	12 / 144	436	64	165	173
5	M12	221	10 / 100	487	82	151	158
6	M12	147	15 / 150	487	86	176	186



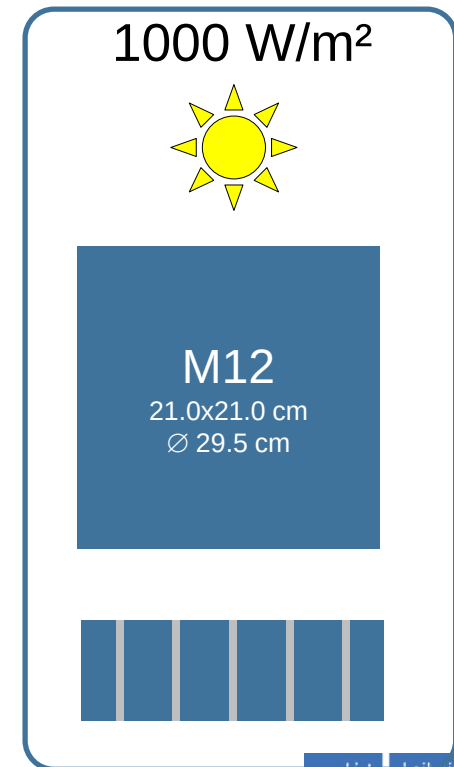
Szenario	Waferformat	Zellfläche [cm ²]	Zellen pro String/Modul	P_{MPP} [W]	P_d [W]	T_{MAX} [°C]	T_z [°C]
1	M3	125	12 / 144	389	52	152	159
2	M3	125	12 / 144	397	58	163	171
3	M4	129	12 / 144	411	60	163	171
4	M6	137	12 / 144	436	64	165	173
5	M12	221	10 / 100	487	82	151	158
6	M12	147	15 / 150	487	86	176	186



Szenario	Waferformat	Zellfläche [cm ²]	Zellen pro String/Modul	P_{MPP} [W]	P_d [W]	T_{MAX} [°C]	T_z [°C]
1	M3	125	12 / 144	389	52	152	159
2	M3	125	12 / 144	397	58	163	171
3	M4	129	12 / 144	411	60	163	171
4	M6	137	12 / 144	436	64	165	173
5	M12	221	10 / 100	487	82	151	158
6	M12	147	15 / 150	487	86	176	186



Szenario	Waferformat	Zellfläche [cm ²]	Zellen pro String/Modul	P_{MPP} [W]	P_d [W]	T_{MAX} [°C]	T_z [°C]
1	M3	125	12 / 144	389	52	152	159
2	M3	125	12 / 144	397	58	163	171
3	M4	129	12 / 144	411	60	163	171
4	M6	137	12 / 144	436	64	165	173
5	M12	221	10 / 100	487	82	151	158
6	M12	147	15 / 150	487	86	176	186



- Hot spot = geringe Sperrspannung + lokaler Durchbruch = typisch für multikristalline Module mit geringer Leistung
- Hot cells = homogen sperrende Zellen in aktuellen Hochleistungsmodulen mit monokristallinen Zellen
- Zunehmende Wafergröße und steigende Modulleistungen führt zu kritische Temperaturen über 150°C bei Hot cells
- Temperaturen über 150°C führen zur Degradation des Einkapselungsmaterials
- Vorteil für Zellen mit größerem Fläche-zu-Umfang Verhältnis → Kühlung durch Zellrand
- 3 Bypassdioden sind nicht mehr ausreichend für aktuelle Hochleistungs-module

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit

Wir danken dem Land Niedersachsen und der Europäischen Union (Horizont 2020, SUPERPV-Projekt, Fördernr. 792245) für die finanzielle Förderung

Kontakt: Robert Witteck – witteck@isfh.de – tel.: +49 (0) 5151 999 429

