



PTB



Metrologie für die Energiemeteorologie Kalibrierkette in der Photovoltaik

Stefan Winter

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig & Berlin
Leiter der Arbeitsgruppe 4.14 „Solarzellen“






**Jahre genau
1887 - 2012**

Metrologie:

- Wissenschaft und Anwendung des richtigen Messens
- Rückführung der Messwerte auf das SI über nationale Normale
- Bestimmung der Messwerte mit Messunsicherheitsbetrachtung

PTB:

- Nationales Metrologieinstitut
- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi)
- 1900 Mitarbeiter
- 140 Mio. € Budget



- 2 -



Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Hauptstandort Braunschweig

Abteilungen:

- Mechanik und Akustik
- Elektrizität
- Chemische Physik und Explosionsschutz
- **Optik**
- Fertigungsmesstechnik
- Ionisierende Strahlung
- Wissenschaftlich-technische Querschnittsaufgaben
- Verwaltungsdienste

Präsidium

(ca. 1300 Mitarbeiter in Braunschweig)



Foto: Angimar, Braunschweig

Arbeitsgruppe Solarzellen

Forschungsschwerpunkte:

- Metrologische Rückführung auf SI
- Charakterisierung von Solarzellen
- World Photovoltaic Scale (WPVS)
- Messtechnik für neue Technologien, z.B. organische PV

Mitarbeiter: 3,5 + 2

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Hauptstandort Braunschweig

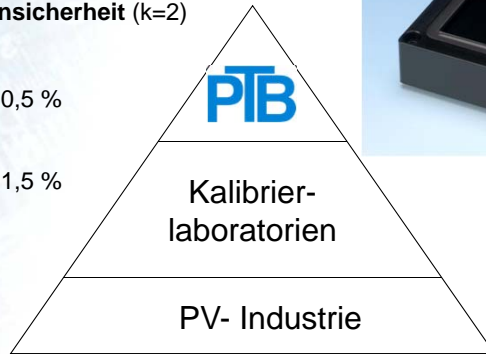
Metrologische Einbindung

PTB

Kalibr.-Kosten **Unsicherheit (k=2)**
in Euro

2800 - 4800 > 0,5 %

500 - 900 > 1,5 %



- 5 -

Typische Kunden

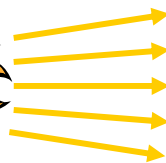
PTB

- **75% Kalibrier-Laboratorien**
- **20% Industrie**
- **5% Forschungslaboratorien, Hochschulen**

- 6 -

1. Aufgabe und Grundlagen
2. Kalibrierverfahren
3. DSR-Verfahren der PTB
4. Qualitätssicherung durch Rückführung und Äquivalenz
5. Zusammenfassung und Ausblick

Optische Leistung



Wirkungsgrad η

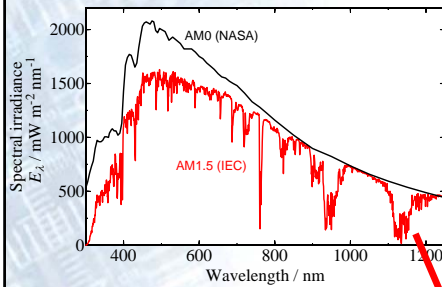
Elektrische Leistung

$$\eta_{AM1.5} = \frac{P_{\text{elektrisch}}}{P_{\text{optisch}}}$$
$$= \frac{V_{OC}(I_{STC}) \cdot FF(I_{STC}) \cdot I_{STC}}{E_{STC} \cdot A_{\text{Solarzelle}}}$$

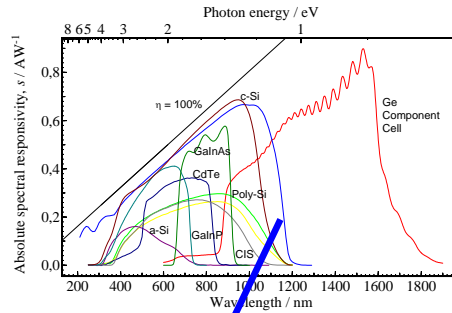
- Messung der Strom-Spannungs-Kennlinie unter „Standard-Testbedingungen“ STC
- benötigt wird i. W. nur I_{STC} der Kurzschlussstrom unter STC,
denn die Kennlinienform ist für c-Si praktisch nicht vom Spektrum abhängig

- Referenz-Sonnenspektrum AM1,5 (AM0)
- Bestrahlungsstärke $E_{STC} = 1000 \text{ W/m}^2$
(10 W Strahlungsleistung auf eine Zelle von 10 cm x 10 cm)
- Zelltemperatur (25°C)
- Winkelabhängigkeit

Referenz-Sonnenspektrum auf der Erde (AM1.5) und im Weltall (AM0)



Spektrale Empfindlichkeit verschiedener Solarzellen



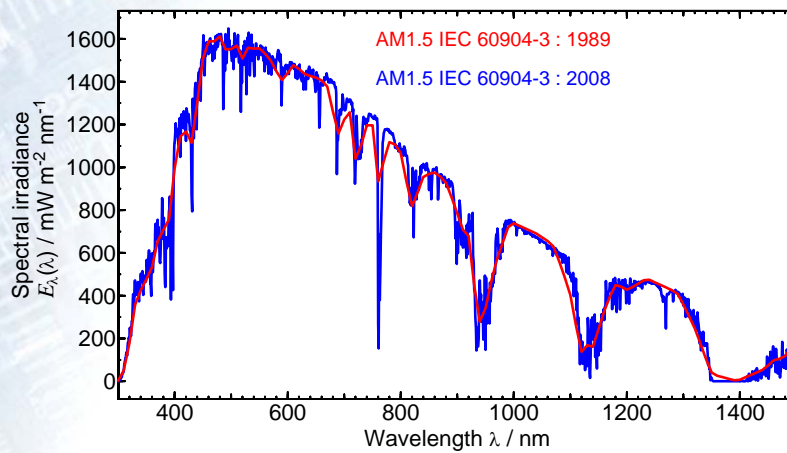
$$I = \int E_{\lambda, \text{Norm}}(\lambda) \cdot s(\lambda) d\lambda$$

$$I(\lambda, E, \varphi, \vartheta, T) = \int E_{\lambda, \text{Norm}}(\lambda, \varphi, \vartheta) \cdot s(\lambda, E, \varphi, \vartheta, T) d\lambda$$

- 11 -

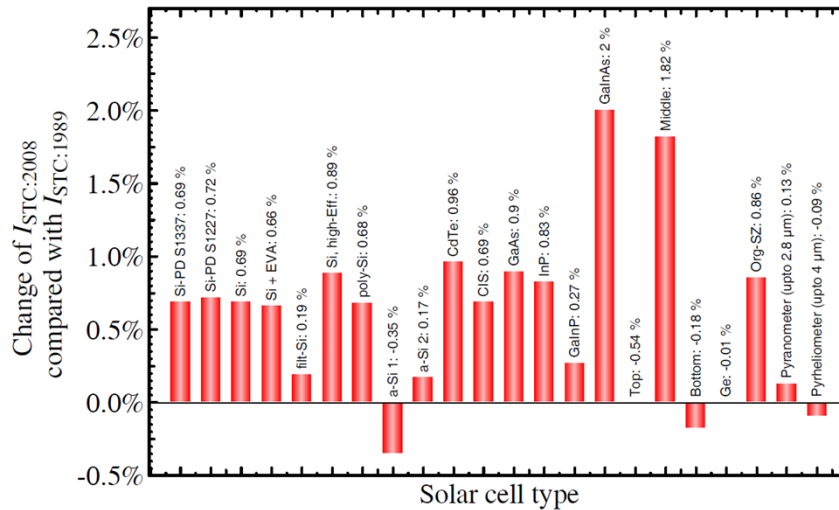
Referenz Sonnenspektrum AM1.5

<http://rredc.nrel.gov/solar/models/SMARTS/>



- 12 -

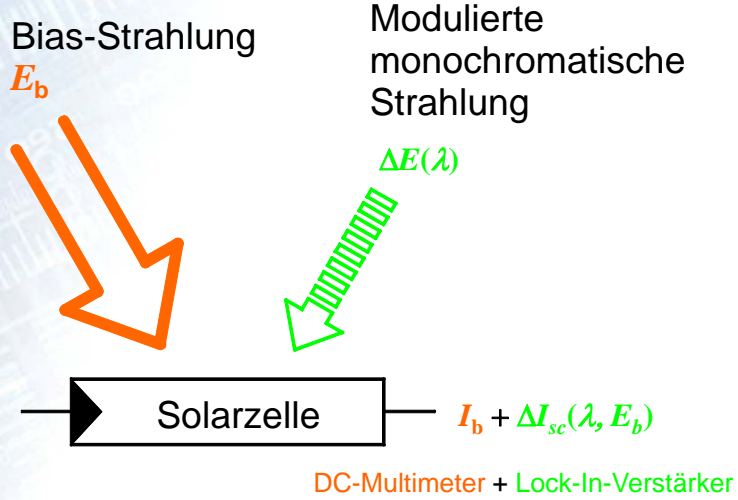
Folge der Änderung des AM1.5-Spektrums



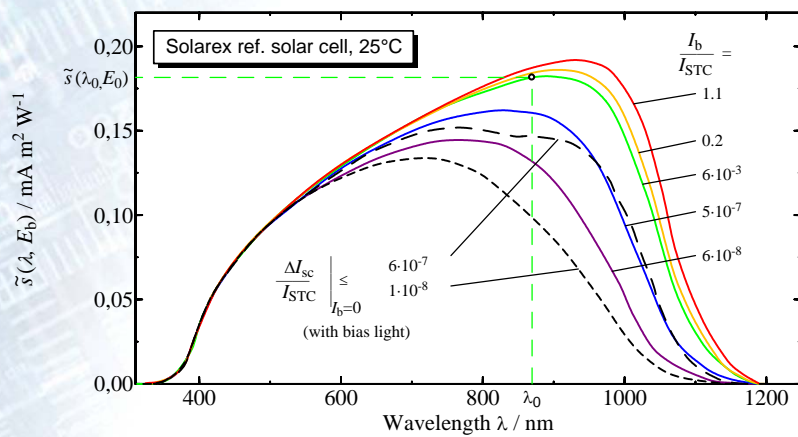
Inhalt

1. Aufgabe und Grundlagen
2. Kalibrierverfahren
3. DSR-Verfahren der PTB
4. Qualitätssicherung durch Rückführung und Äquivalenz
5. Zusammenfassung und Ausblick

DSR-Messverfahren der PTB
DSR = Differential Spectral Responsivity



Nichtlinearität einer einkristallinen Silizium-Solarzelle

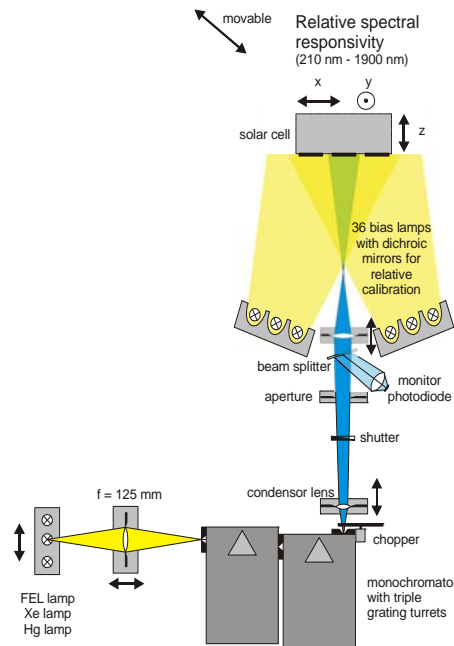


Solarzellen- kalibrierapparatur in der PTB

(210 nm ... 1900 nm)

DSR-Verfahren mit
3 Grundprinzipien der
Spektroradiometrie:

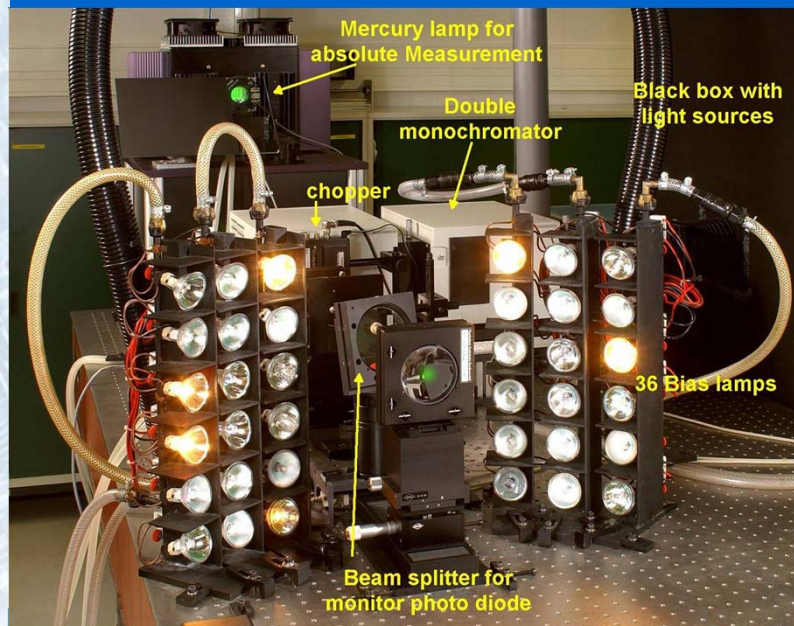
- Substitutionsverfahren
- Monitorstabilisierung
- Trennung von Absolut-
u. Relativmessung



- 17 -

DSR-Messplatz (ohne Abschirmung)

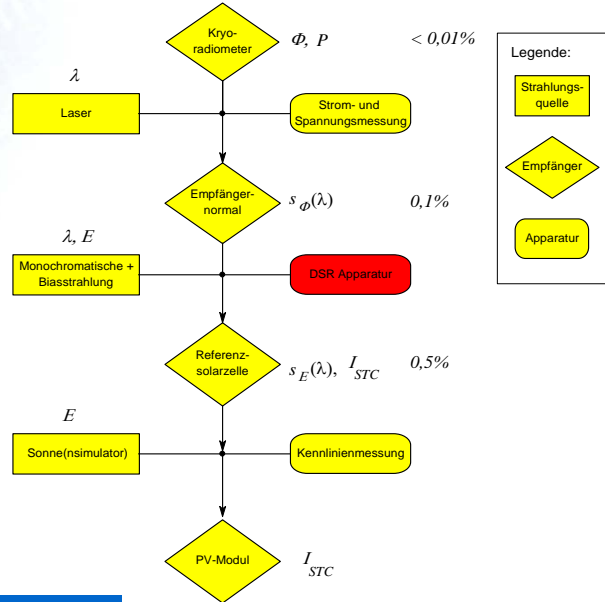
PTB





1. Aufgabe und Grundlagen
2. Kalibrierverfahren
3. DSR-Verfahren der PTB
4. Qualitätssicherung durch Rückführung und Äquivalenz
5. Zusammenfassung und Ausblick

Photovoltaik-Kalibrierkette der PTB



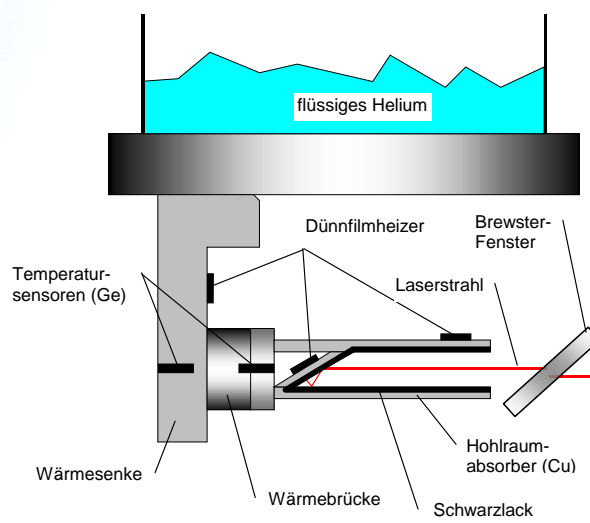
- 21 -

Kryoradiometer – das nationale Normal zur Messung der optischen Strahlungsleistung

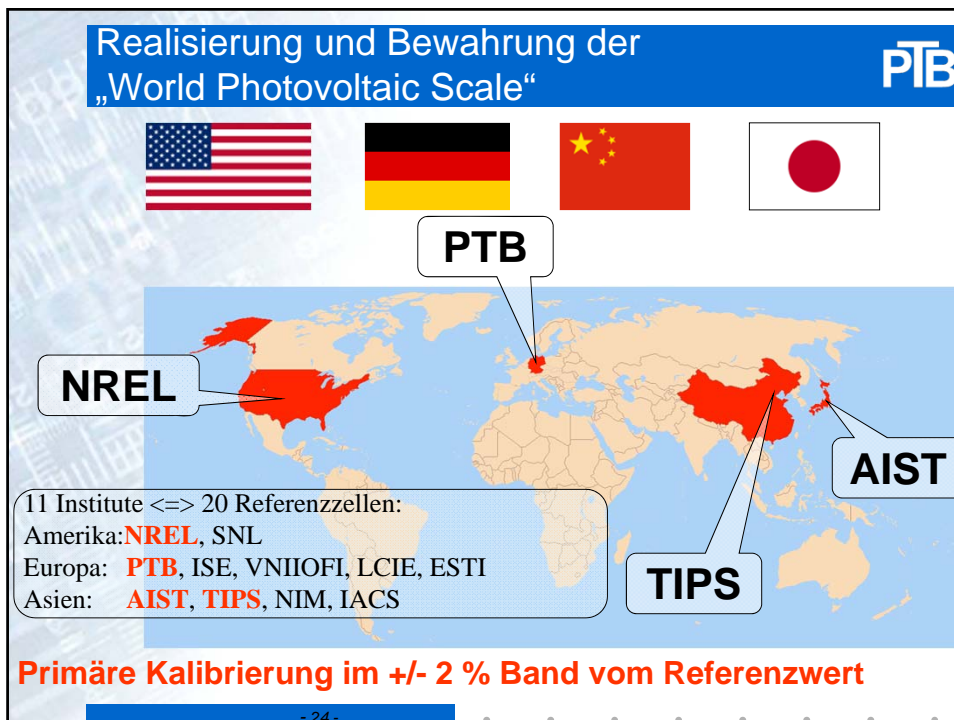
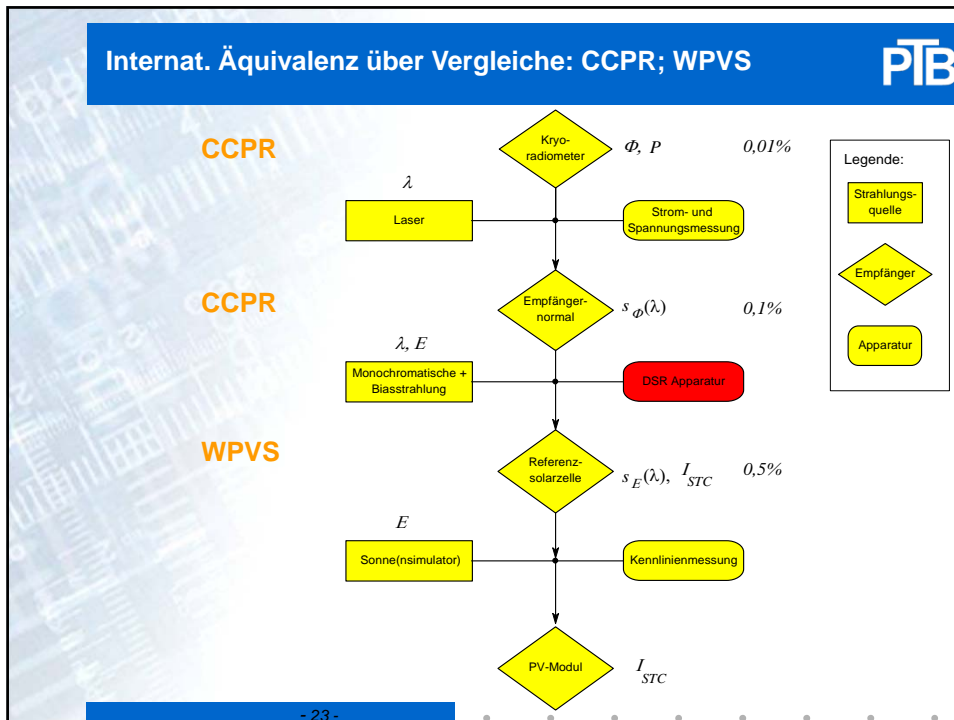


Substitution der Strahlungsleistung durch elektrische Leistung

- Messunsicherheit: $\approx 10^{-5}$
- Reflexionsgrad: $\approx 2 \times 10^{-4}$
- Empfindlichkeit: $\approx 1 \text{ K/mW}$
- Zeitkonstante: $\approx 10 \text{ s}$



- 22 -



- Aufgrund des rapide steigenden PV-Marktes erlangt die zuverlässige Rückführung von Solarzellen eine immer wichtigere Bedeutung.
- Es gibt zwei komplementäre Kalibrieransätze
 - a) die direkte Messung
 - b) die detaillierte spektrale Charakterisierung
- Die WPVS verbessert die internationale Äquivalenz zwischen verschiedenen Laboratorien, die unterschiedliche Kalibrierverfahren anwenden.

Ausblick:

- Erweiterung des DSR-Messplatzes auf weitere Solarzellentypen (Rückkontaktzellen, organische SZ, Mini-Module)