



Metrologie für die Energiemeteorologie Kalibrierkette in der Photovoltaik

Stefan Winter

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



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 -

Standort Braunschweig



**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)

- 3 -

Standort Braunschweig



Arbeitsgruppe Solarzellen



Foto: Angimar, Braunschweig

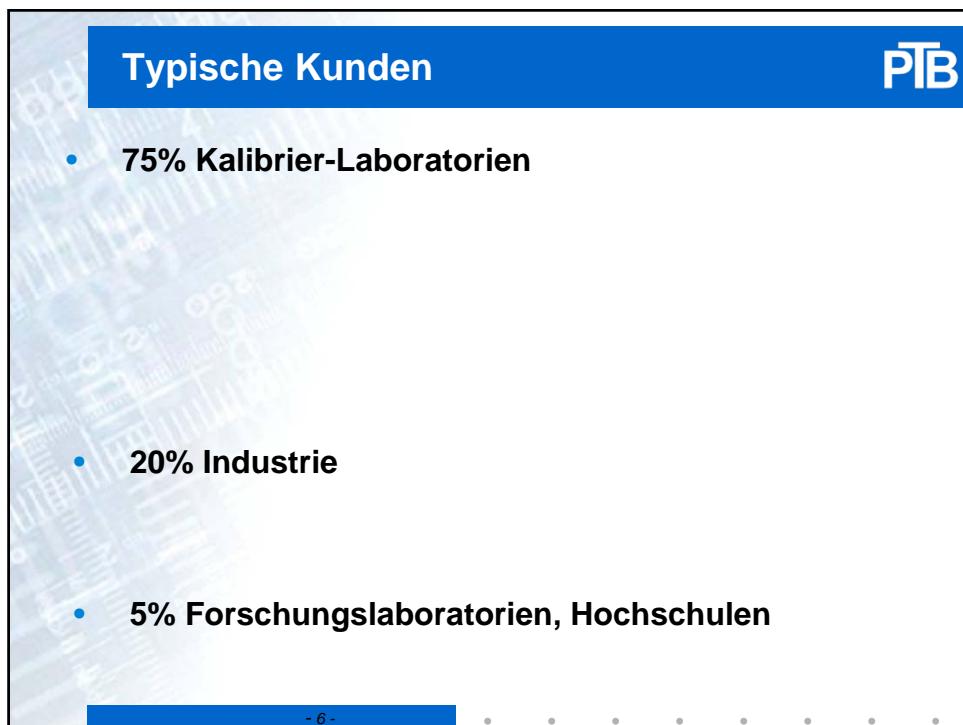
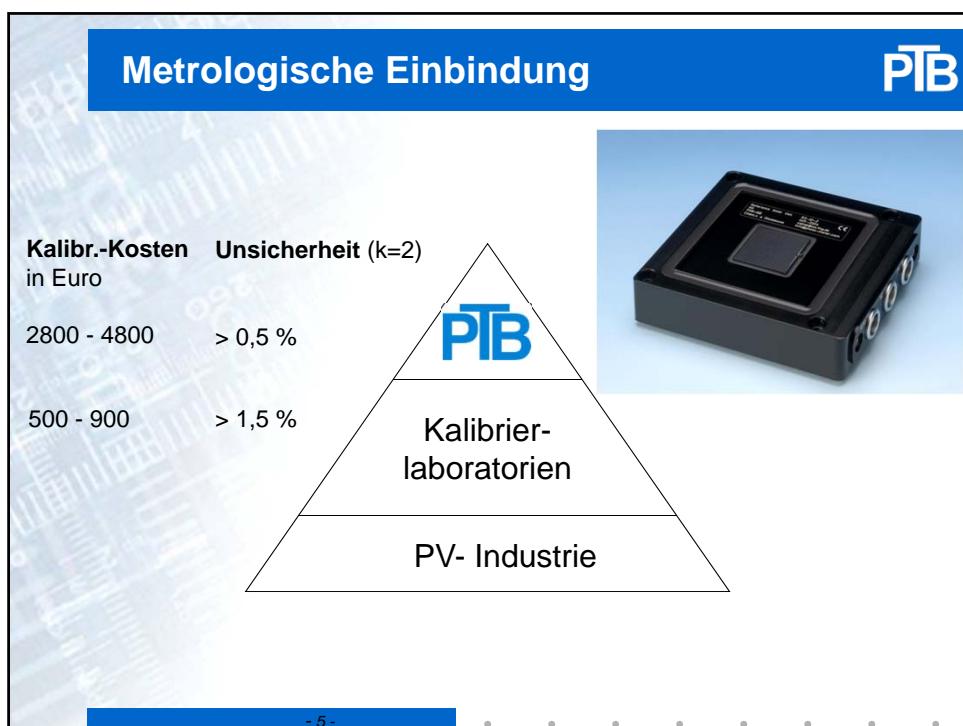
Forschungsschwerpunkte:

- 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**

- 4 -



Inhalt

PTB

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

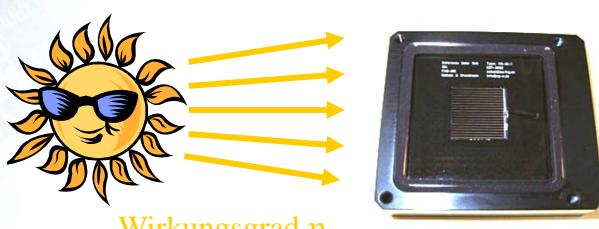
- 7 -



Aufgabe: Genaue Bestimmung des Wirkungsgrads einer Solarzelle

PTB

Optische Leistung



Elektrische Leistung

- 8 -



Wirkungsgrad einer Solarzelle



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

- 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

- 9 -

Spezifikation der Messbedingungen STC: Standard Test Conditions



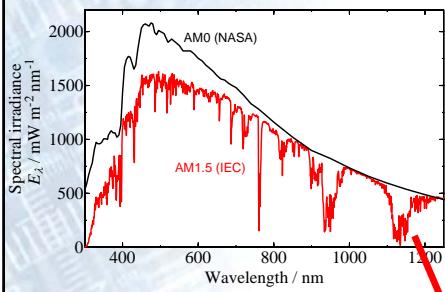
- Referenz-Sonnenspektrum AM1,5 (AM0)
- Bestrahlungsstärke $E_{\text{STC}} = 1000 \text{ W/m}^2$
(10 W Strahlungsleistung auf eine Zelle von 10 cm x 10 cm)
- Zellentemperatur (25°C)
- Winkelabhängigkeit

- 10 -

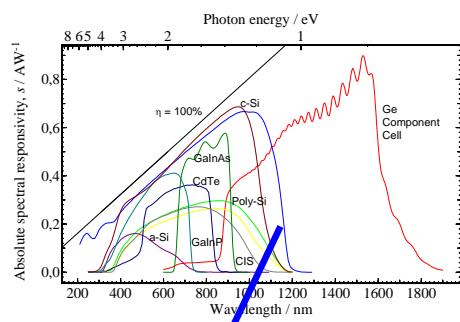
Metrologischer Hintergrund

PTB

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



Spektrale Empfindlichkeit verschiedener Solarzellen



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

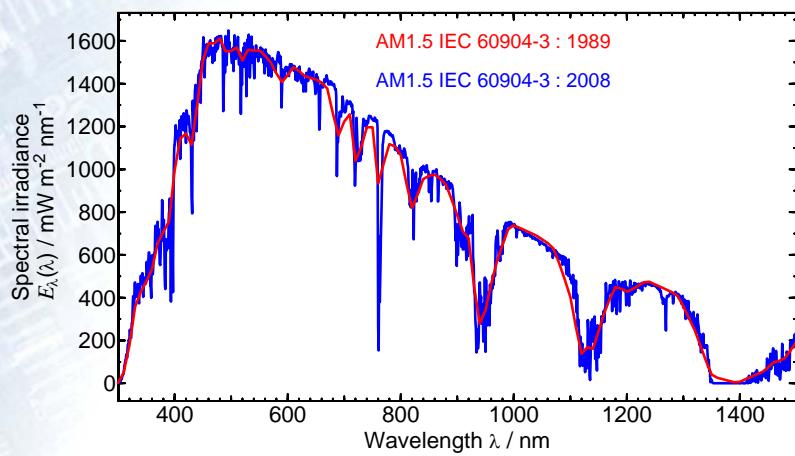
$$I(\lambda, E, \varphi, \vartheta, T) = \int E_{\lambda, \text{Norm}}(\lambda, \varphi, \vartheta) \cdot s(\lambda, E, \varphi, \vartheta, T) d\lambda$$

- 11 -

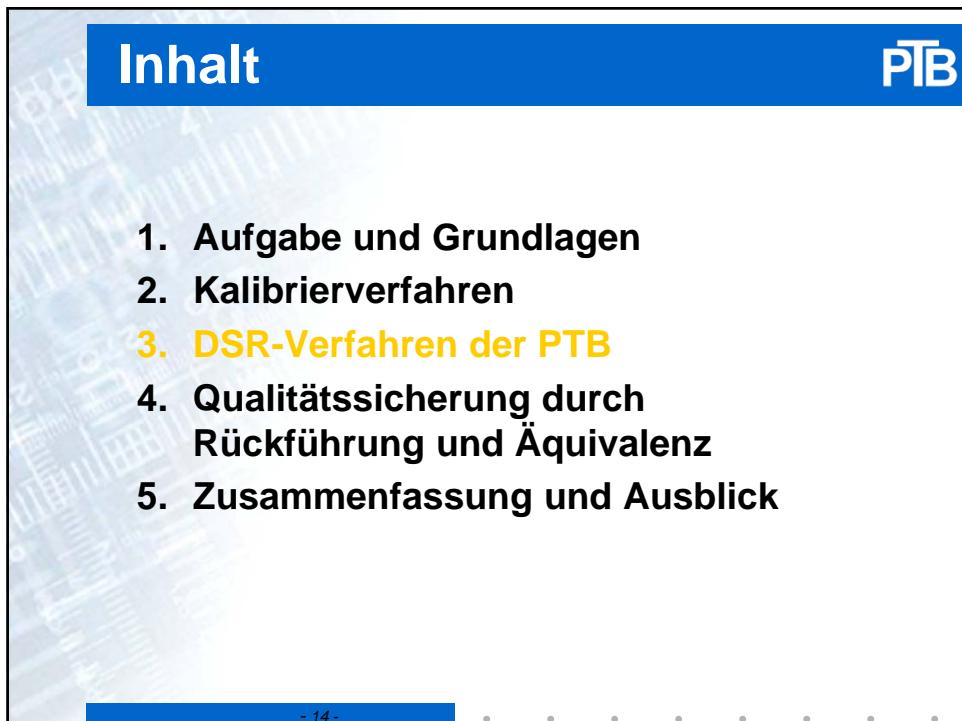
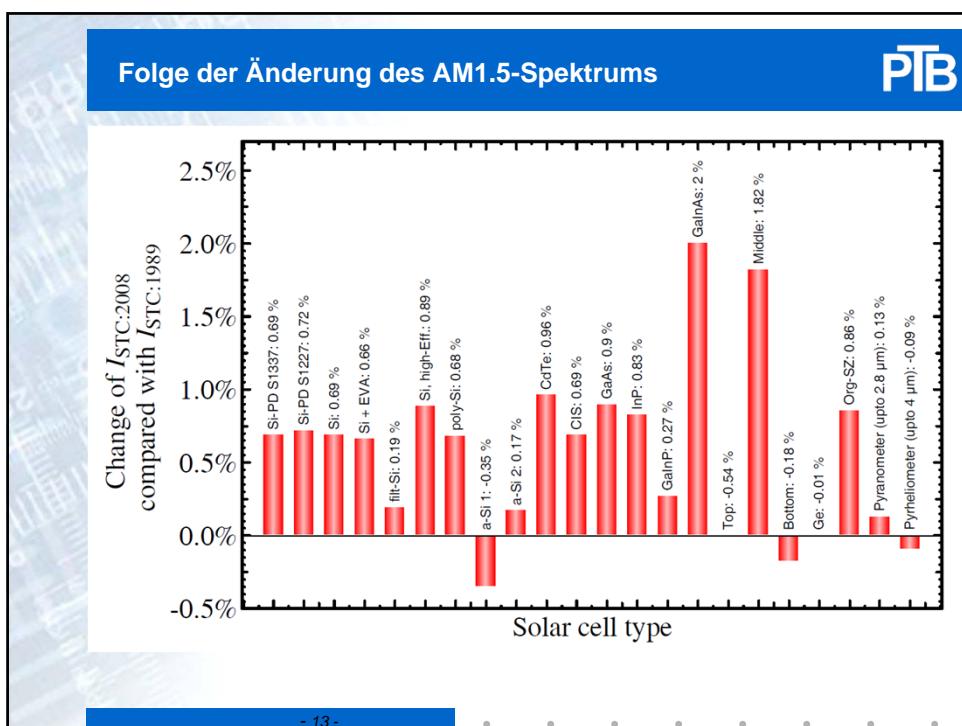
Referenz Sonnenspektrum AM1.5

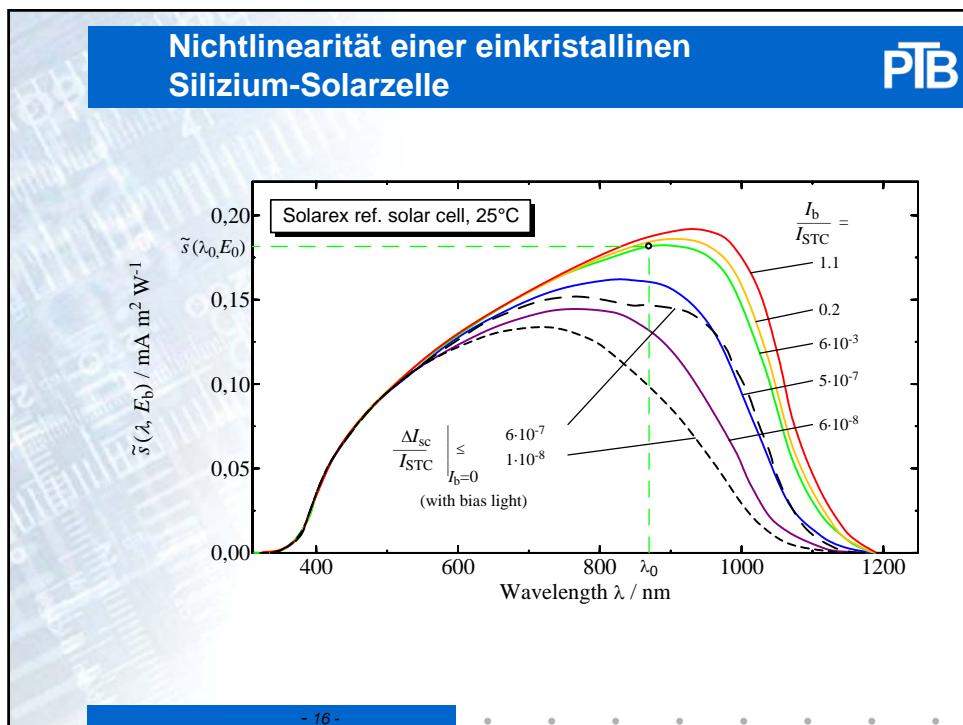
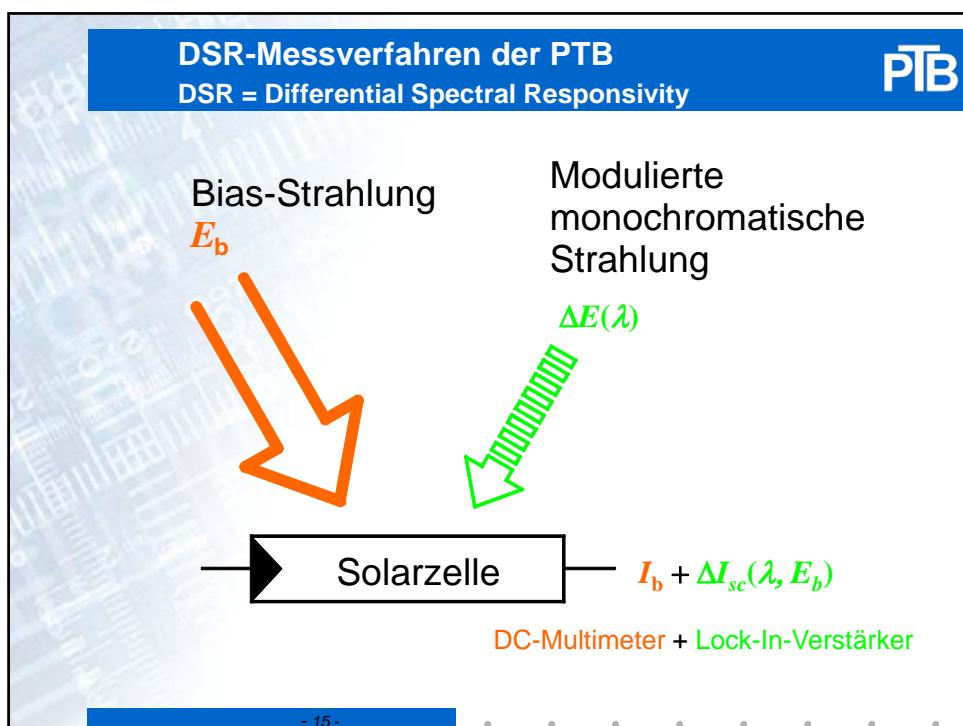
PTB

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



- 12 -





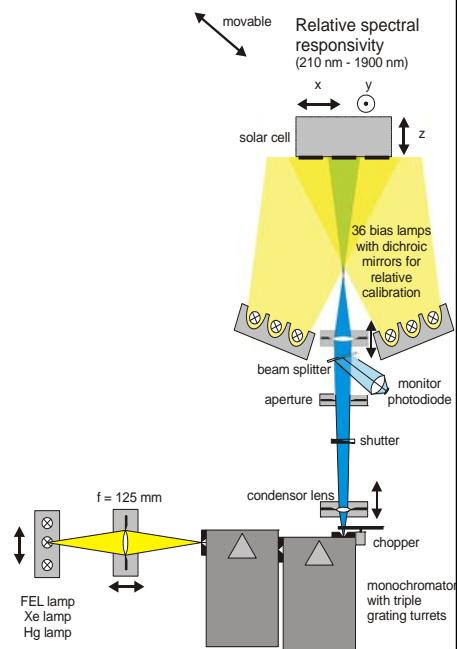
Solarzellen-kalibrierapparatur in der PTB

(210 nm ...1900 nm)

DSR-Verfahren mit
3 Grundprinzipien der
Spektroradiometrie:

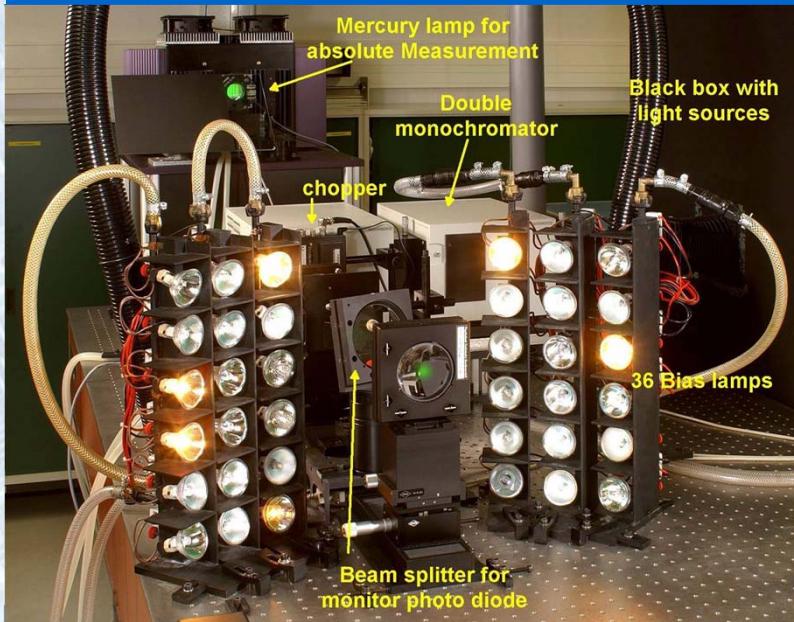
- Substitutionsverfahren
- Monitorstabilisierung
- Trennung von Absolut-
u. Relativmessung

- 17 -



DSR-Messplatz (ohne Abschirmung)

PTB



DSR-Messplatz (ohne Abschirmung)



- 19 -

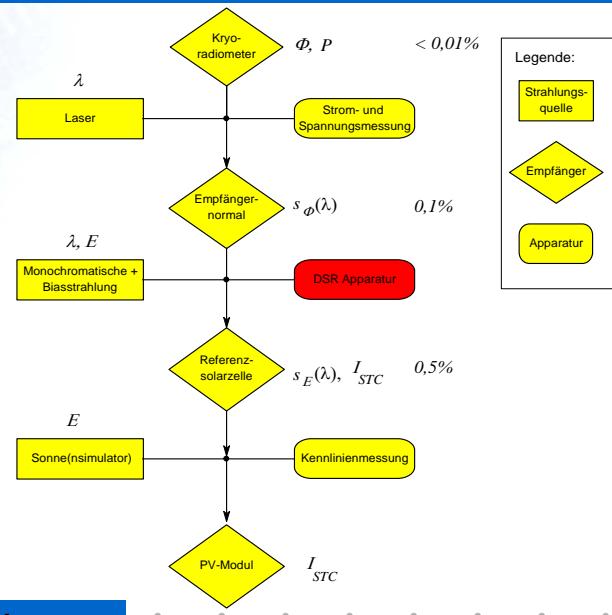
Inhalt



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

- 20 -

Photovoltaik-Kalibrierkette der PTB



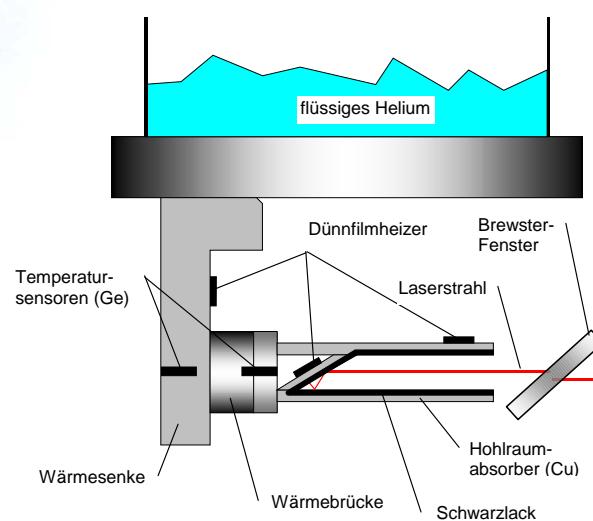
- 21 -

Kryoradiometer – das nationale Normal zur Messung der optischen Strahlungsleistung

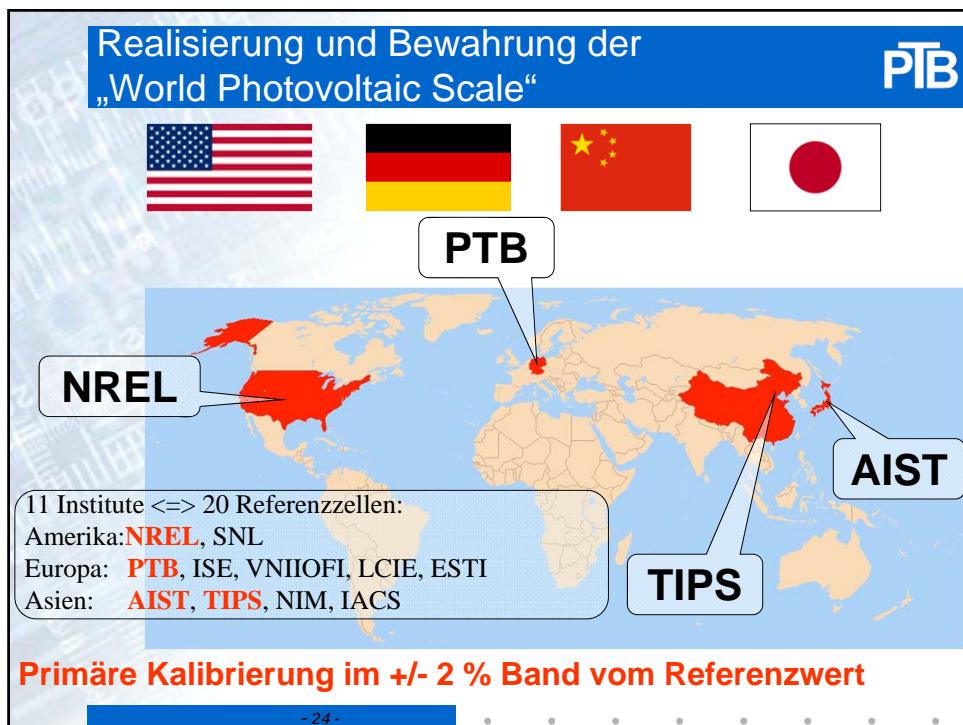
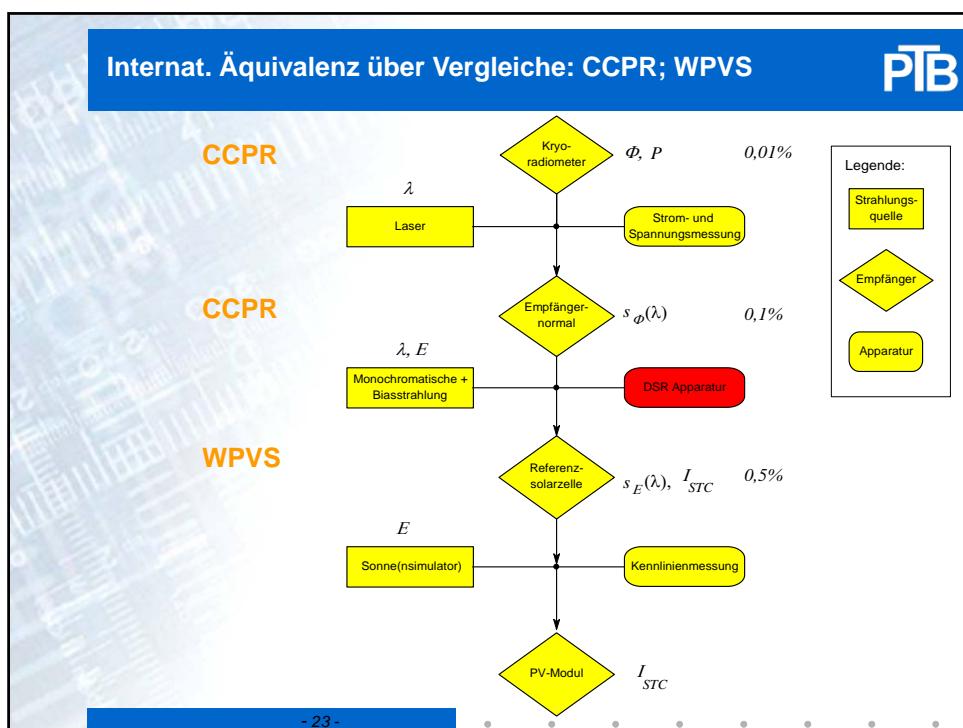


Substitution der Strahlungsleistung durch elektrische Leistung

- **Messunsicherheit:**
≈ 10^{-5}
- **Reflexionsgrad:**
≈ 2×10^{-4}
- **Empfindlichkeit:**
≈ 1 K/mW
- **Zeitkonstante:**
≈ 10 s



- 22 -



Zusammenfassung

PTB

- 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 (Rückkontakteilen, organische SZ, Mini-Module)