

Passive Strahlungskühlung: Charakterisierung von Materialien und Methoden zur Bestimmung der Kühlleistung

J. Manara, T. Stark, M. Arduini, A. Göbel, M. Brütting, J. Popp,
A. Narymany Shandy, M. Zipf, J. Hartmann, H.-P. Ebert

Gliederung

Passive Strahlungskühlung

- Anwendungen und Potential
- Wärme- und Strahlungsaustausch mit der Umgebung

Charakterisierung der infrarot-optischen Eigenschaften

- Durchführung von spektrometrischer Messungen
- Bestimmung von solarem Absorptionsgrad und IR-Emissionsgrad

Bestimmung der Performance unter realen Bedingungen

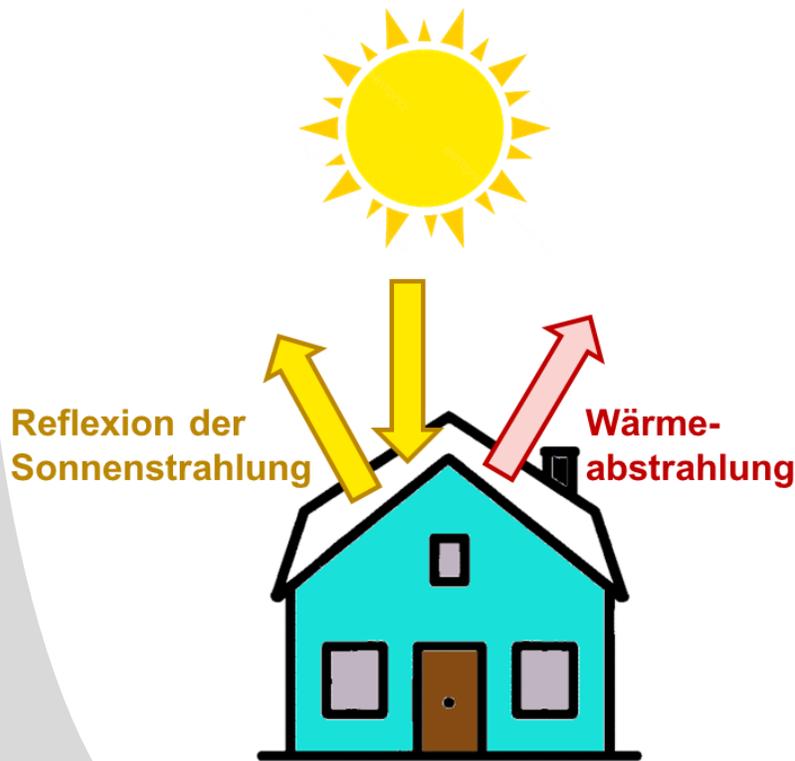
- Bestimmung der Unterkühlung unter die Umgebungstemperatur
- Bestimmung der Kühlleistung

Spektral-selektive Oberflächen zur passiven Strahlungskühlung

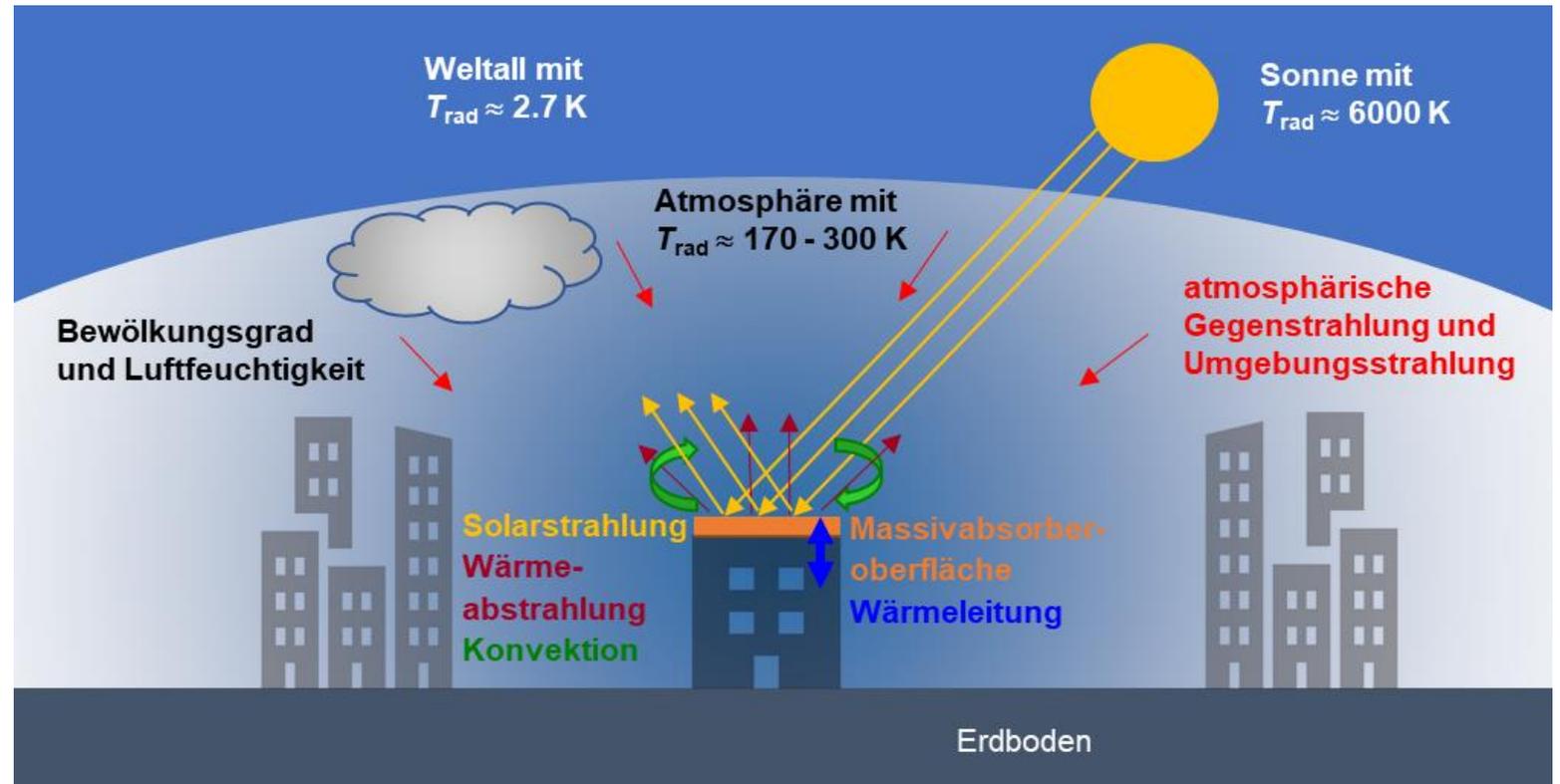
Passive Radiative Cooling (PRC) und Passive Daytime Radiative Cooling (PDRC)

Stand der Technik: weiße Oberflächen („White Roof“ oder „Cool Roof“)

Neue Entwicklungen: Strahlungskühlung auch bei Sonneneinstrahlung



09.04.2025 – AKT



© Center for Applied Energy Research

Passive Strahlungskühlung

Beispiele

Kykladen (Griechenland)



Typische kykladische Architektur mit weißen Gebäudeoberflächen

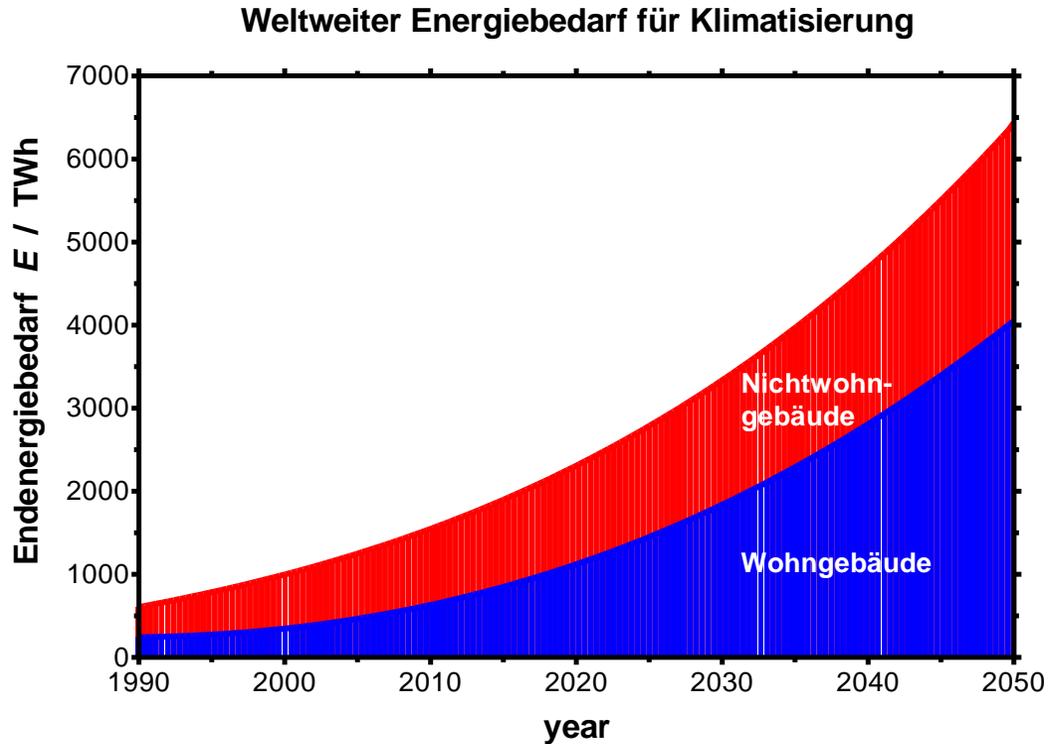
Ruanda



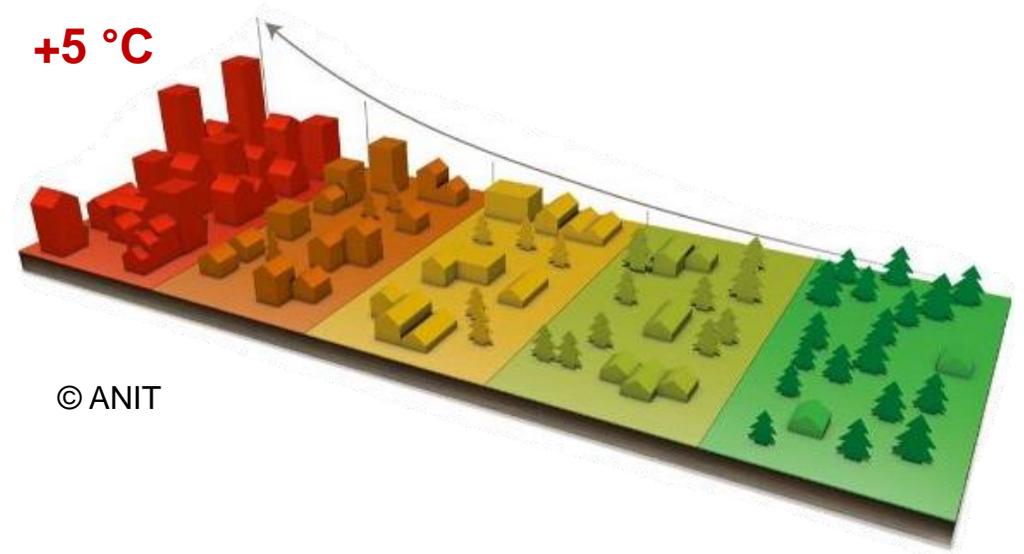
Projekt „Cool White“ der Deutschen Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) in Zusammenarbeit mit Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) in Berlin

Passive Strahlungskühlung

Vorteile



OECD/IEA (2018): The Future of Cooling: Opportunities for energy-efficient air conditioning



Höhere Temperaturen in urbanen Umgebungen: Städtische Wärmeinseln (Urban Heat Island (UHI))

Wärmeübergangs-Mechanismen

Wärmeübergang an der Oberfläche

$$\underbrace{\alpha_{\text{sol}} \cdot I_{\text{sol}}}_{\text{solarer Wärmeeintrag}} = \underbrace{\epsilon_{\text{hem}} \cdot \sigma \cdot (T_{\text{Oberfläche}}^4 - T_{\text{Himmel}}^4)}_{\text{Wärmeübergang durch Wärmestrahlung}} + \underbrace{h_{\text{Konvektion}} \cdot (T_{\text{Oberfläche}} - T_{\text{Luft}})}_{\text{Wärmeübergang durch Konvektion}}$$

Geringe Oberflächentemperatur $T_{\text{Oberfläche}}$

durch

- **geringen solaren Absorptionsgrad α_{sol}**
- **hohen hemisphärischen Gesamt-Emissionsgrad ϵ_{hem}**

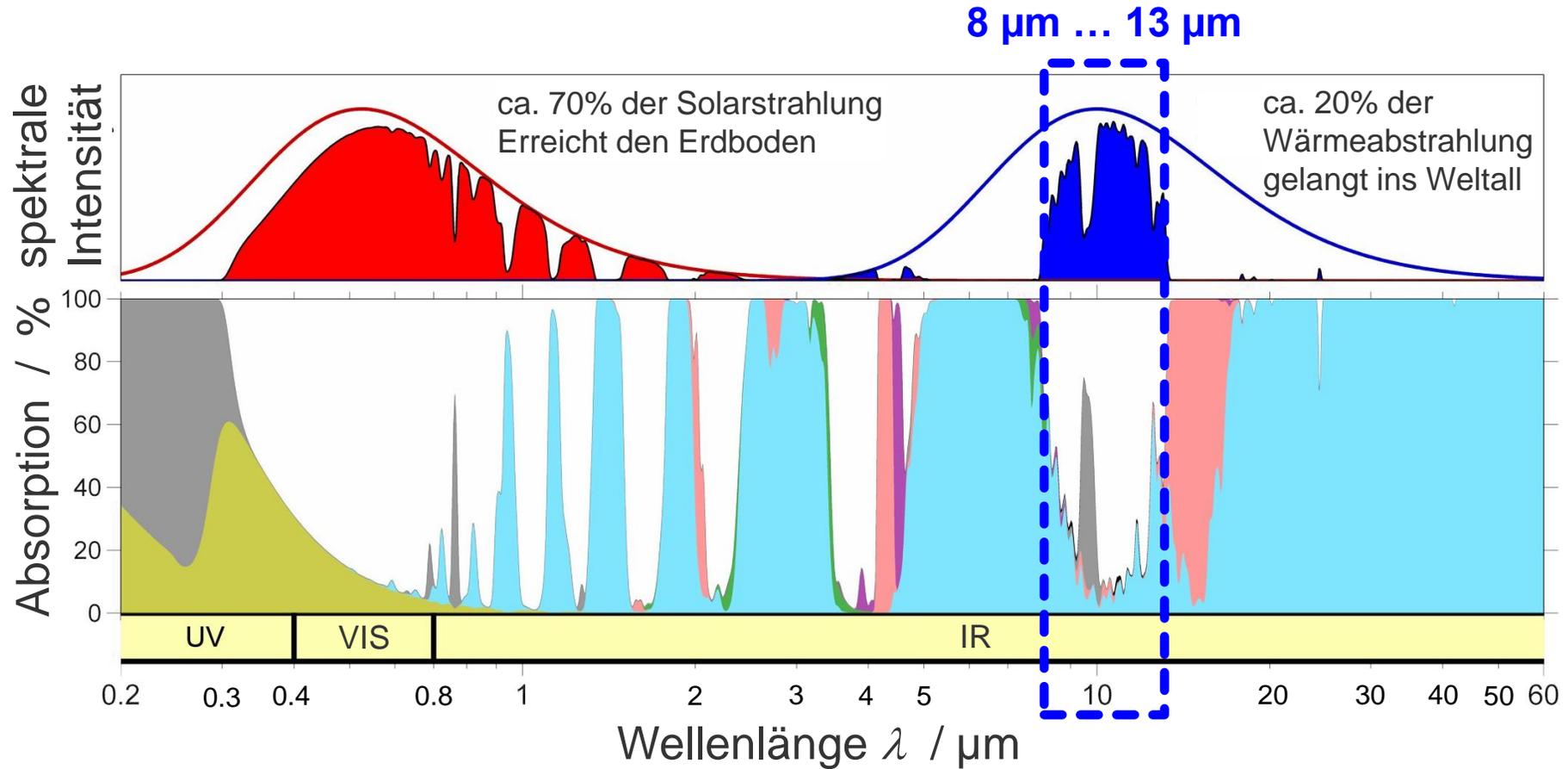
Solar Reflectance Index (SRI)

SRI = 0 für $\alpha_{\text{sol}} = 0.95$ und $\epsilon_{\text{h}} = 0.9$

SRI = 100 für $\alpha_{\text{sol}} = 0.20$ und $\epsilon_{\text{h}} = 0.9$

→ resultierende Oberflächentemperatur im Vergleich zu schwarzer (SRI = 0) und weißer (SRI = 100) Referenzfarbe.

Atmosphärische Fenster



Absorptionsbanden ■ H₂O ■ CO₂ ■ CH₄ ■ N₂O ■ O₂ & O₃ ■ sonstige ■ Rayleigh-streuung

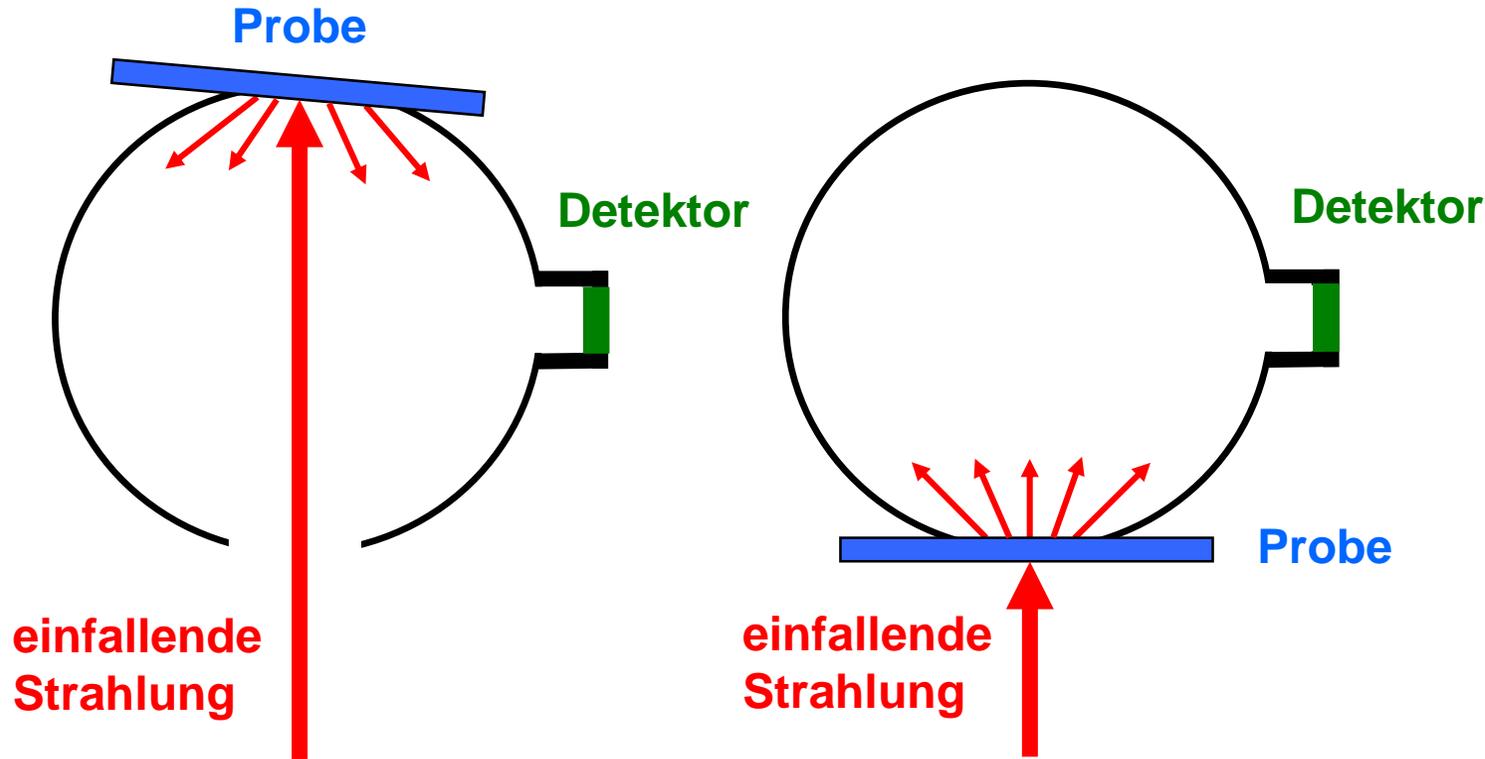
FTIR-Spektrometer mit Ulbrichtkugel

Bestimmung von Emission und Absorption

Normaler spektraler Emissionsgrad $\varepsilon_n(\lambda, T)$
 bzw. normaler spektraler Absorptionsgrad $\alpha_n(\lambda, T)$

$$\varepsilon_n(\lambda, T) = \alpha_n(\lambda, T)$$

$$= 1 - R_{gh}(\lambda) - T_{gh}(\lambda)$$



spektraler
 gerichtet-hemisphärischer
 Reflexionsgrad R_{gh}

spektraler
 gerichtet-hemisphärischer
 Transmissionsgrad T_{gh}

Emissionsgrad und Absorptionsgrad

Normaler spektraler Emissionsgrad $\varepsilon_n(\lambda, T)$
 bzw. normaler spektraler Absorptionsgrad $\alpha_n(\lambda, T)$

$$\begin{aligned} \varepsilon_n(\lambda, T) &= \alpha_n(\lambda, T) \\ &= 1 - R_{gh}(\lambda) - T_{gh}(\lambda) \end{aligned}$$

Normaler Gesamt-Emissionsgrad $\varepsilon_n(T)$
 mit dem Planck-Spektrum $M_{bb}(\lambda, T)$

$$\varepsilon_n(T) = \frac{\int_0^\infty \varepsilon_n(\lambda, T) \cdot M_{bb}(\lambda, T) \cdot d\lambda}{\int_0^\infty M_{bb}(\lambda, T) \cdot d\lambda}$$

Hemisphärischer Gesamt-Emissionsgrad $\varepsilon_{hem}(T)$
 mit den Abstrahlwinkeln θ und φ

$$\varepsilon_{hem}(T) = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{\text{Halb-raum}} \varepsilon(\theta, \varphi, T) \cdot \cos \theta \cdot d\omega$$

Emissionsgrad und Absorptionsgrad

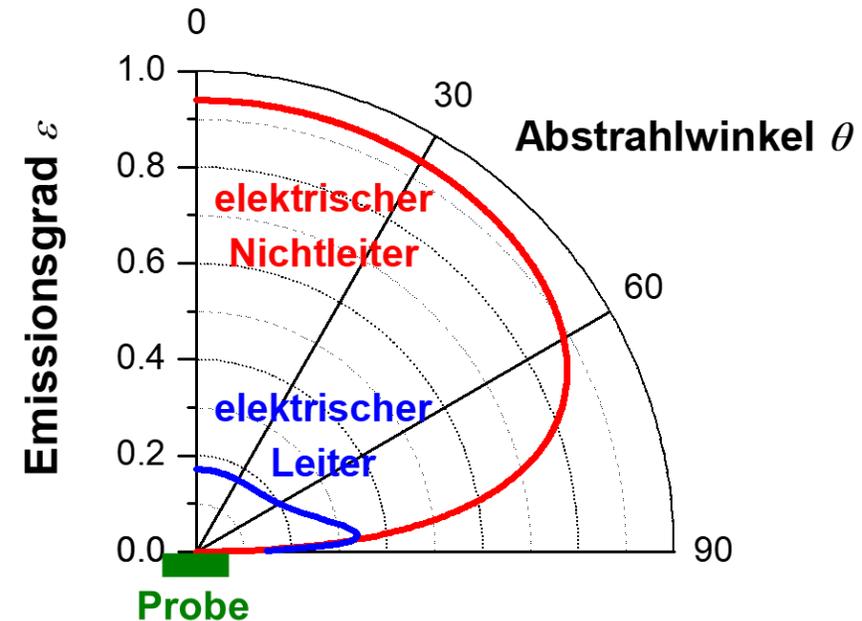
Hemisphärischer Gesamt-Emissionsgrad

$$\varepsilon_{\text{hem}}(T) = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{\text{Halb-raum}} \varepsilon(\theta, \varphi, T) \cdot \cos \theta \cdot d\omega$$

DIN EN 12898

$$\varepsilon_{\text{hem}} = 1.1887 \cdot \varepsilon_n - 0.4967 \cdot \varepsilon_n^2 + 0.2452 \cdot \varepsilon_n^3$$

Typische Winkelabhängigkeit



Emissionsgrad und Absorptionsgrad

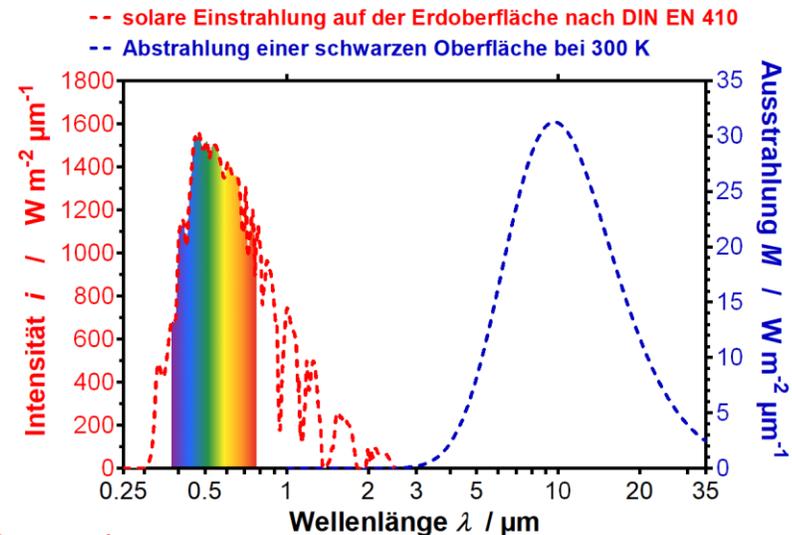
Normaler spektraler Emissionsgrad $\varepsilon_n(\lambda, T)$
 bzw. normaler spektraler Absorptionsgrad $\alpha_n(\lambda, T)$

$$\begin{aligned} \varepsilon_n(\lambda, T) &= \alpha_n(\lambda, T) \\ &= 1 - R_{gh}(\lambda) - T_{gh}(\lambda) \end{aligned}$$

Solarer Absorptionsgrad $\alpha_{sol}(T)$
 mit dem Solar-Spektrum auf der
 Erdoberfläche $i_{sol}(\lambda)$

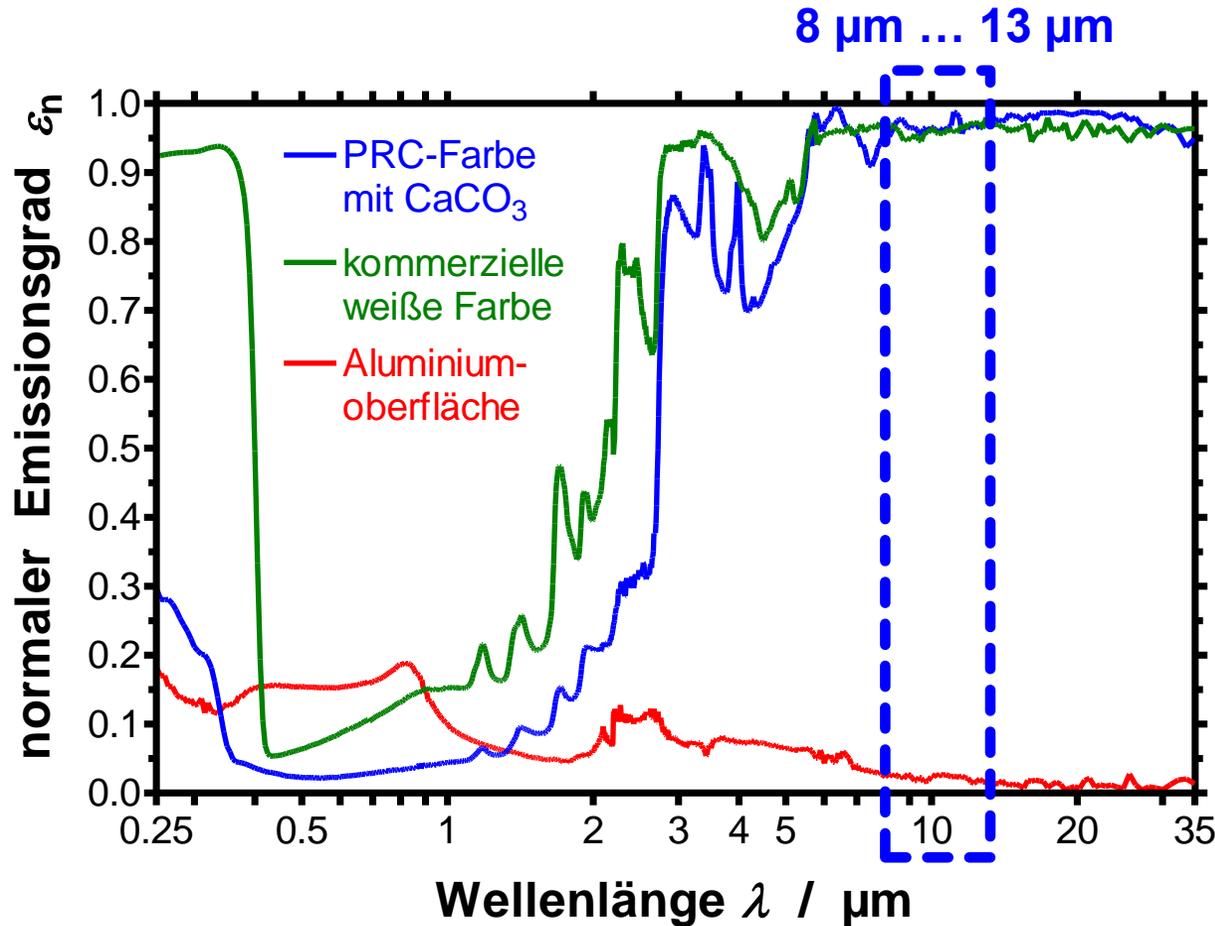
$$\alpha_{sol}(T) = \frac{\int_{0.3}^{2.5} \alpha_n(\lambda, T) \cdot i_{sol}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{0.3}^{2.5} i_{sol}(\lambda) \cdot d\lambda}$$

Solar-Spektrum i und Planck-Spektrum M



Charakterisierung von Oberflächen

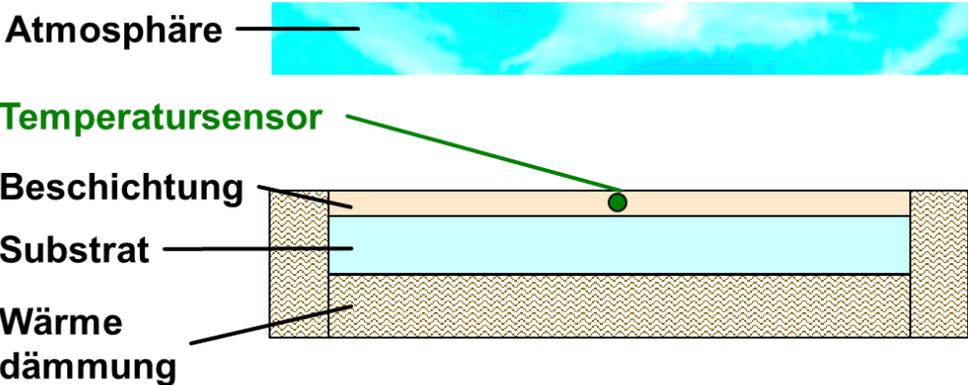
Solarer Absorptionsgrad und hemisphärischer Emissionsgrad



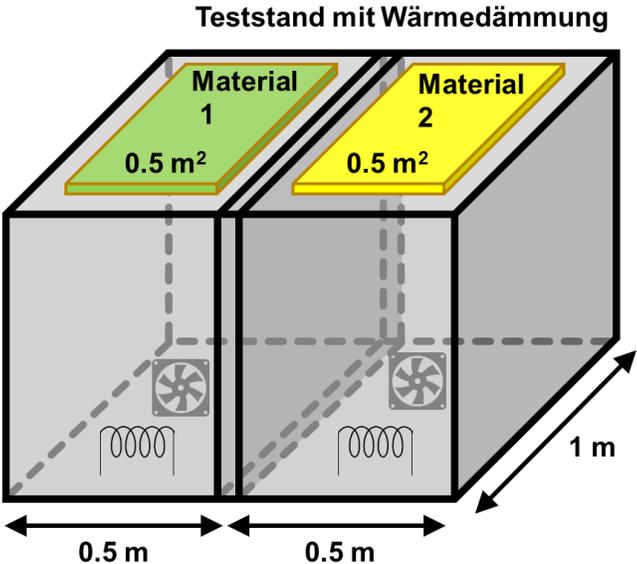
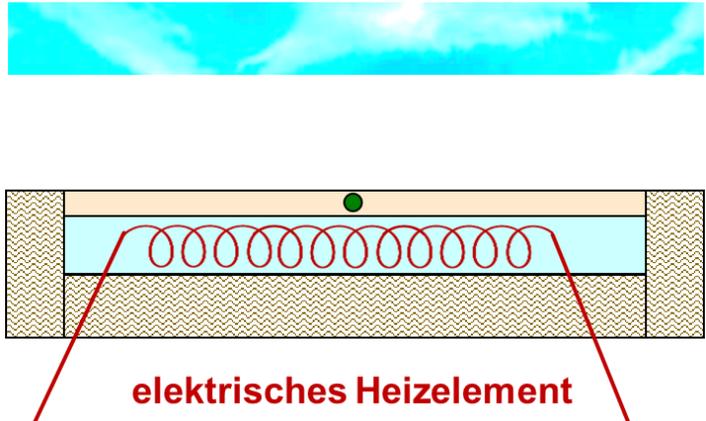
	α_{sol}	ϵ_{hem}	SRI
PRC-Farbe mit CaCO_3	0.05	0.91	122
kommerzielle weiße Farbe	0.18	0.90	103
Aluminiumoberfläche	0.14	0.03	92

Messung im Außenteststand unter realen Bedingungen

Unterkühlung unter Umgebungstemperatur



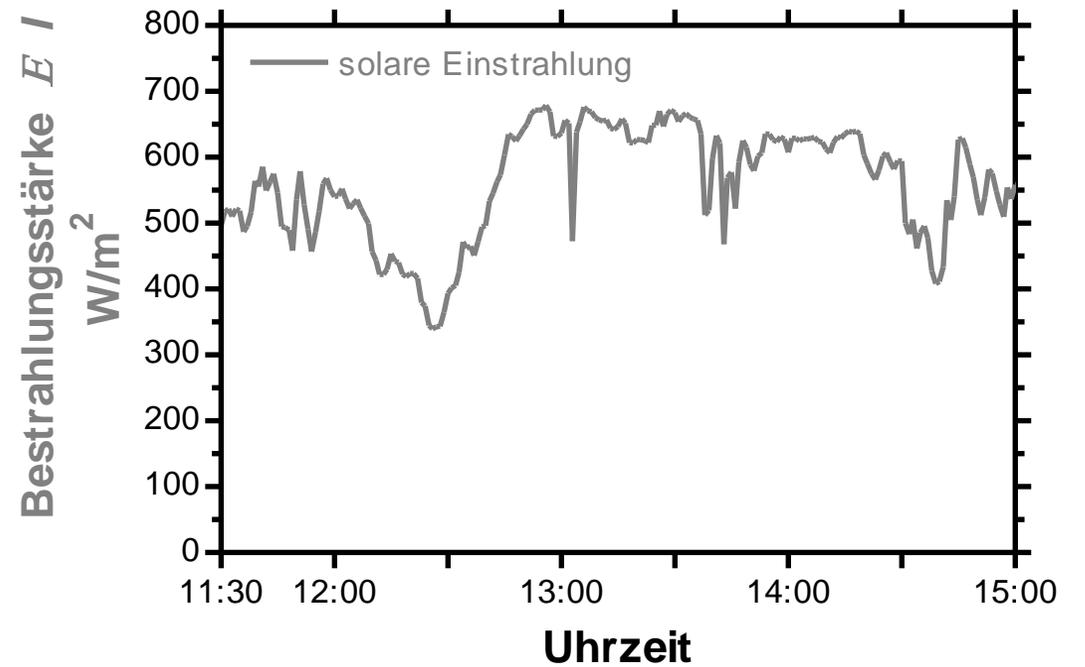
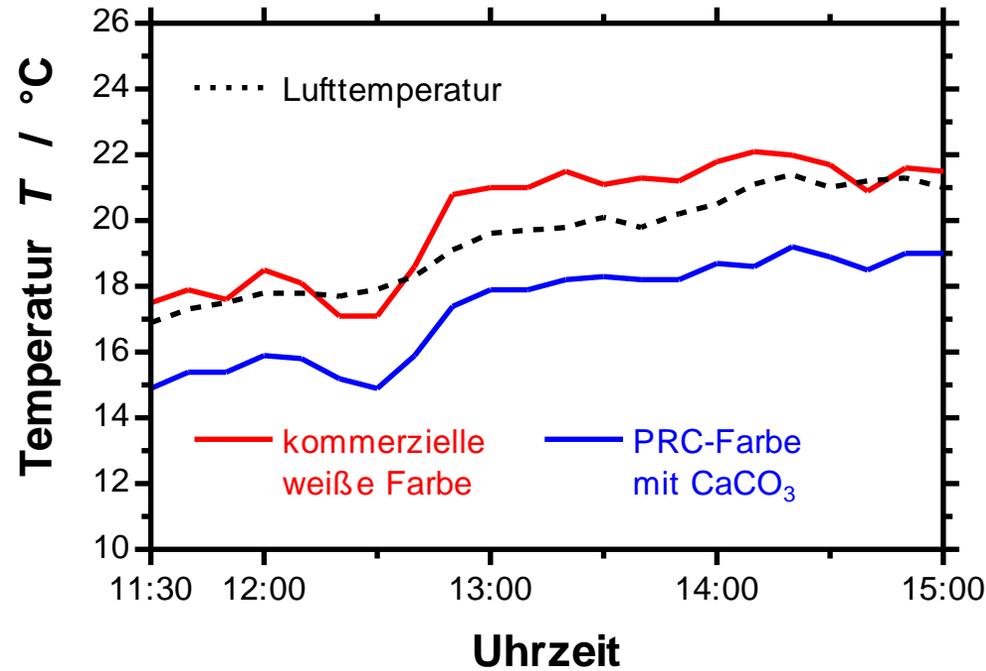
Indirekte Bestimmung der Kühlleistung



Messung im Außenteststand unter realen Bedingungen

Bestimmung der Unterkühlung unter Umgebungstemperatur

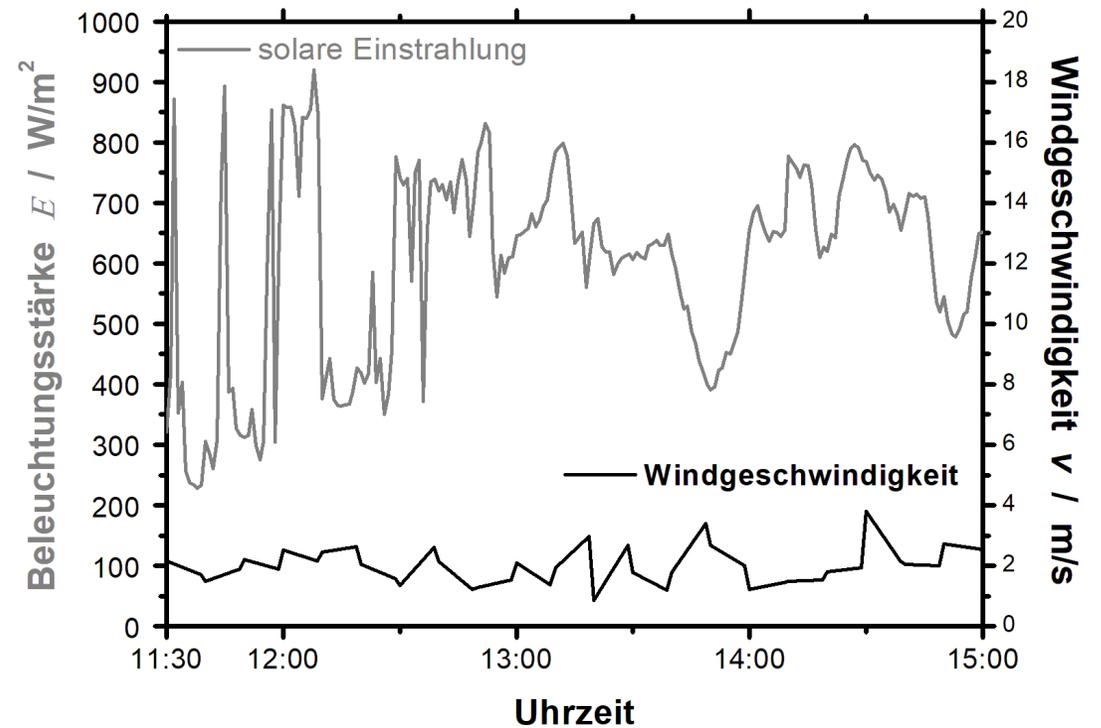
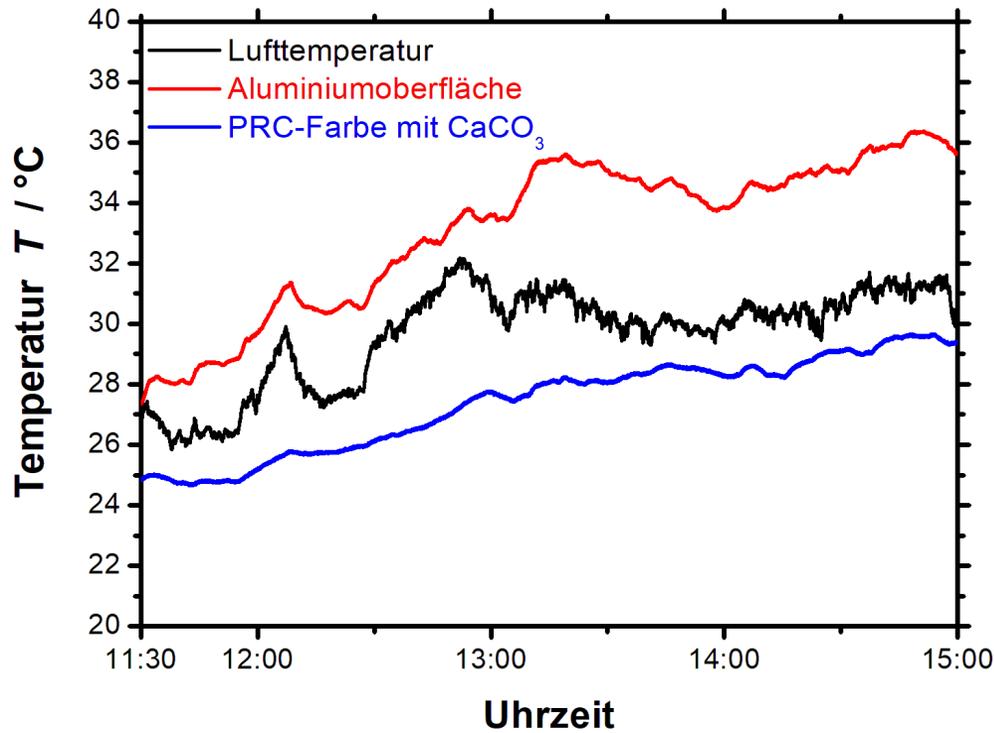
Temperaturverlauf an einem Tag im September bei Sonnenschein



Messung im Außenteststand unter realen Bedingungen

Bestimmung der Unterkühlung unter Umgebungstemperatur

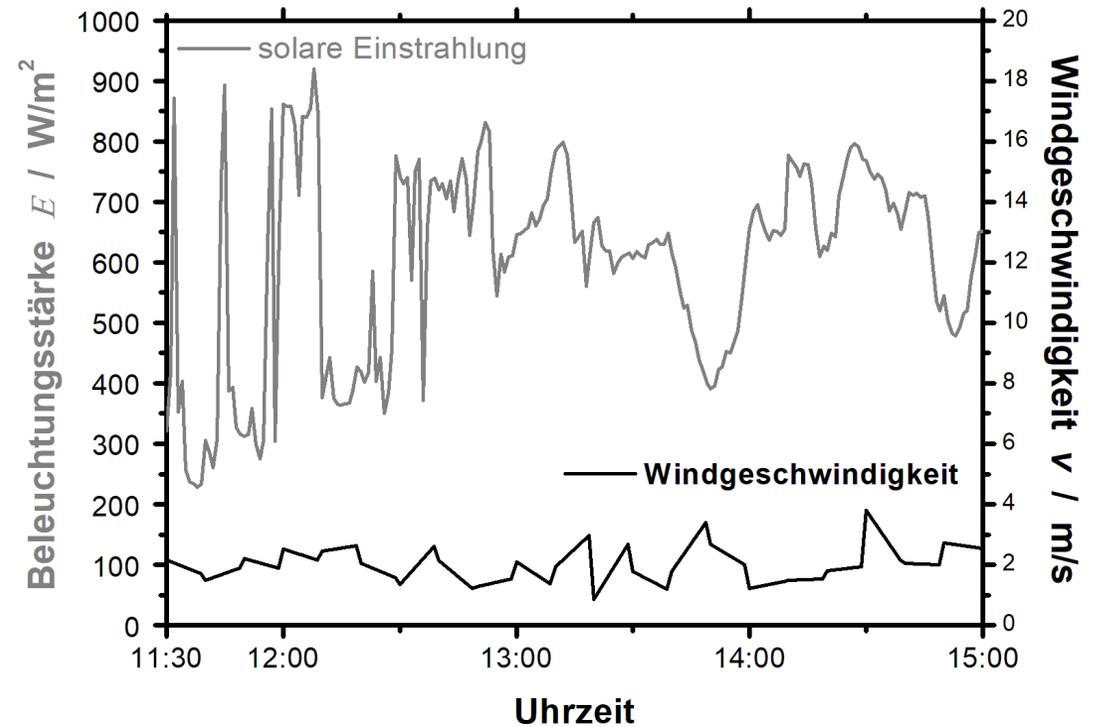
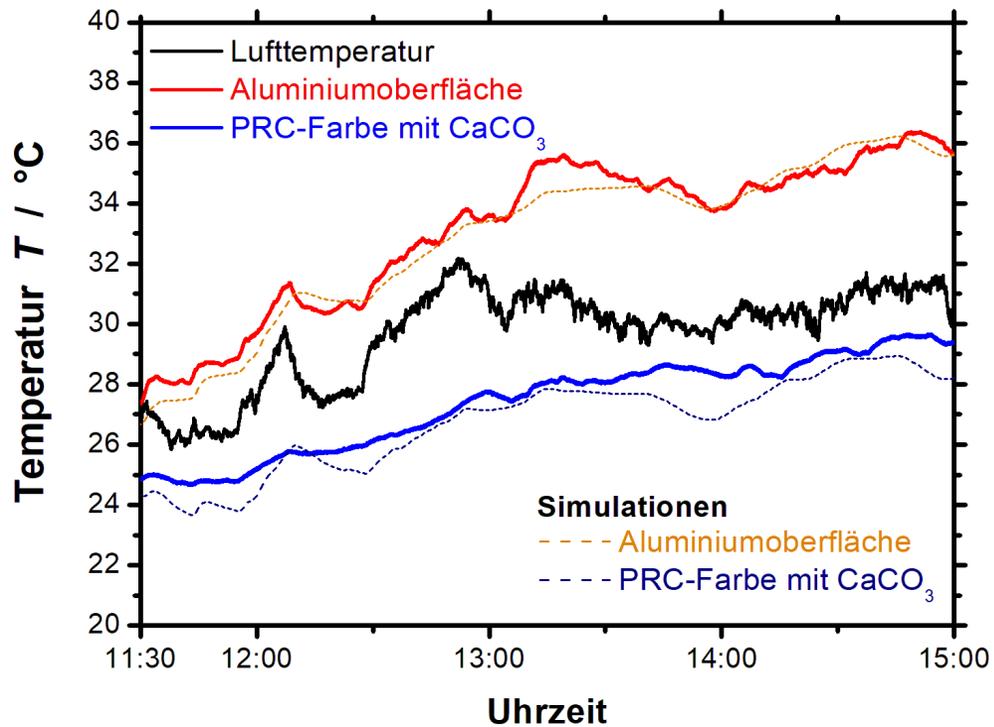
Temperaturverlauf an einem Tag im August bei Sonnenschein



Messung im Außenteststand unter realen Bedingungen

Bestimmung der Unterkühlung unter Umgebungstemperatur

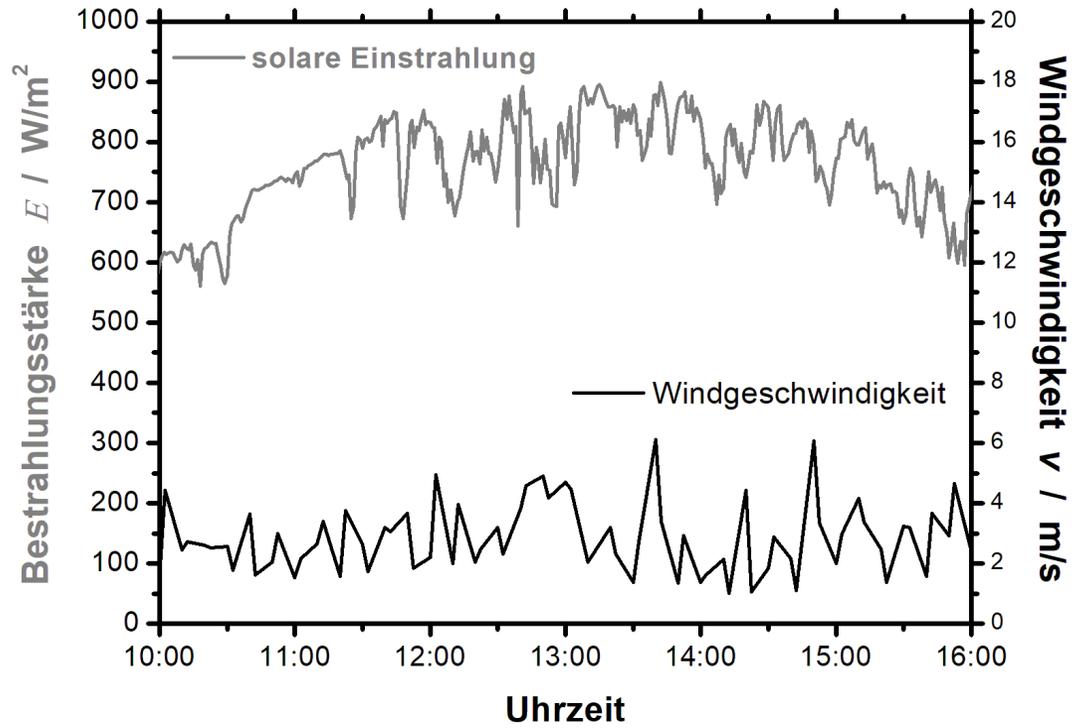
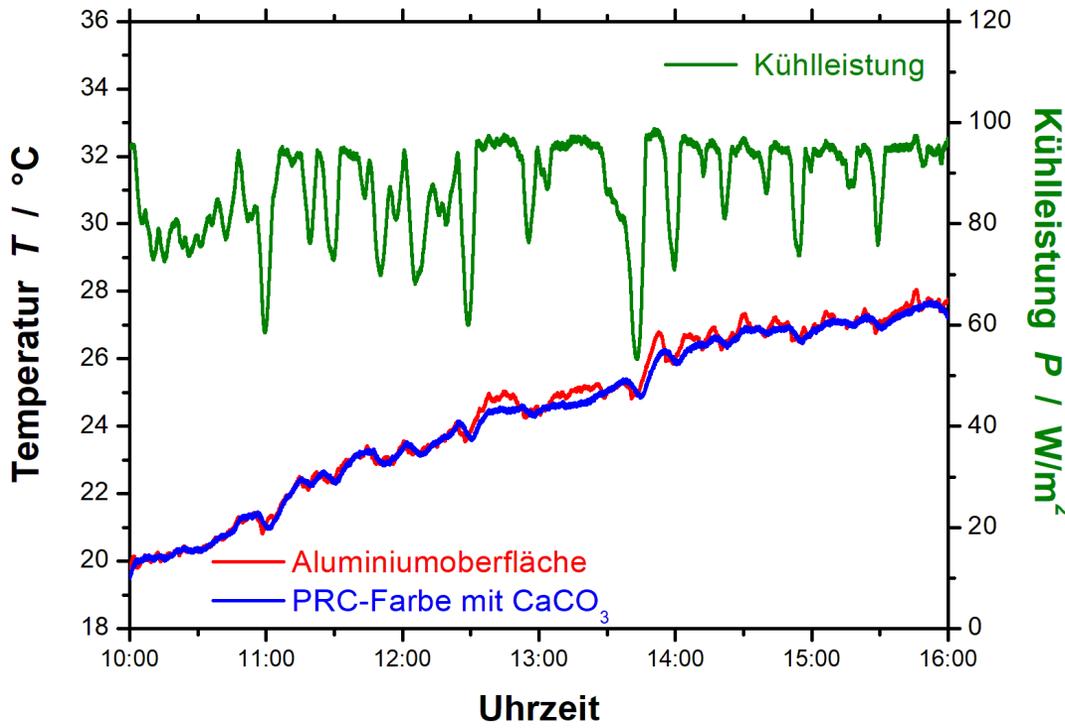
Temperaturverlauf an einem Tag im August bei Sonnenschein



Messung im Außenteststand unter realen Bedingungen

Indirekte Bestimmung der Kühlleistung

Temperaturverlauf an einem Tag im Mai bei Sonnenschein



Metrological Framework for Passive Radiative Cooling

PaRaMetri 



Co-funded by the European Union

METROLOGY PARTNERSHIP



Passive Strahlungskühlung

- Präparation und Charakterisierung von PRC-Materialien
- Demonstration der Kühlleistung unter realen Bedingungen

Entwicklung und Validierung von Messmethoden

- Quantifizierung der Performance von PRC-Materialien
- Vergleichende Bewertung von Produkten

Zukünftige Aktivitäten

- Erarbeitung eines Praxisleitfadens für Anwender
- Beitrag zur Normung und zur Qualitätssicherung sowohl von PRC-Materialien als auch von Messapparaturen

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

Dr. Jochen Manara

Center for Applied Energy Research e.V.
Magdalene-Schoch-Straße 3
97074 Würzburg

T + 49 (0) 931 70564-346

F + 49 (0) 931 70564-600

jochen.manara@cae-zero-carbon.de

www.cae-zero-carbon.de

PaRaMetric 

The project 21GRD03 PaRaMetric receives funding from the European Partnership on Metrology, cofinanced by the European Union's Horizon Europe Research and Innovation Programme and from the Participating States.



Co-funded by the
European Union

**METROLOGY
PARTNERSHIP**

