

Bayerisches Zentrum für  
Angewandte Energieforschung e.V.

# Bestimmung der zum Betrieb von Gasturbinen notwendigen infrarot-optischen Kenngrößen bei hohen Temperaturen und Drücken

J. Manara, M. Zipf, T. Stark,  
M. Arduini-Schuster, J. Hartmann, H.-P. Ebert

MIT SONNE UND VERSTAND.

© ZAE Bayern

Jahrestagung 2015 des  
Arbeitskreises Thermophysik  
Aachen, 09.-10. März 2015



- **Motivation**
  - EU-Projekt STARGATE
  - Strahlungsthermometrie im LWIR
- **Infrarot-optische Charakterisierungen**
  - Charakterisierung der Wärmedämmschichten
  - Charakterisierung der Verbrennungsgase
  - Berührungslose Temperaturmessung
- **Zusammenfassung**
  - Verwendete Charakterisierungsverfahren
  - Optimaler Wellenlängenbereich

# MOTIVATION



**ZAE BAYERN**  
Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

## STARGATE:

Sensors towards advanced Monitoring and Control of Gas Turbine Engines

## Ziel:

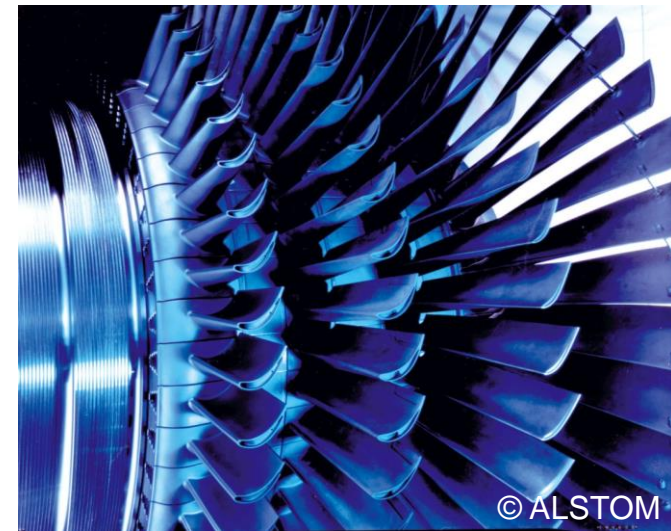
Entwicklung verbesserter Messsensorik zur Steigerung der Energieeffizienz in Gasturbinen.

## Temperaturmessung:

Berührungslose Temperaturmessung zur Optimierung der Prozessparameter.

## Thermischer Wirkungsgrad:

$$\eta_{\text{th, Brayton}} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$



# STATIONÄRE HEIßGASTURBINEN



**ZAE BAYERN**

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung



© Siemens

## 1. Erhöhung der Temperatur

Einsatz keramischer Wärmedämmschichten (TBCs) zur Erhöhung der Betriebstemperatur.

## 2. Exakte Bestimmung der Temperatur

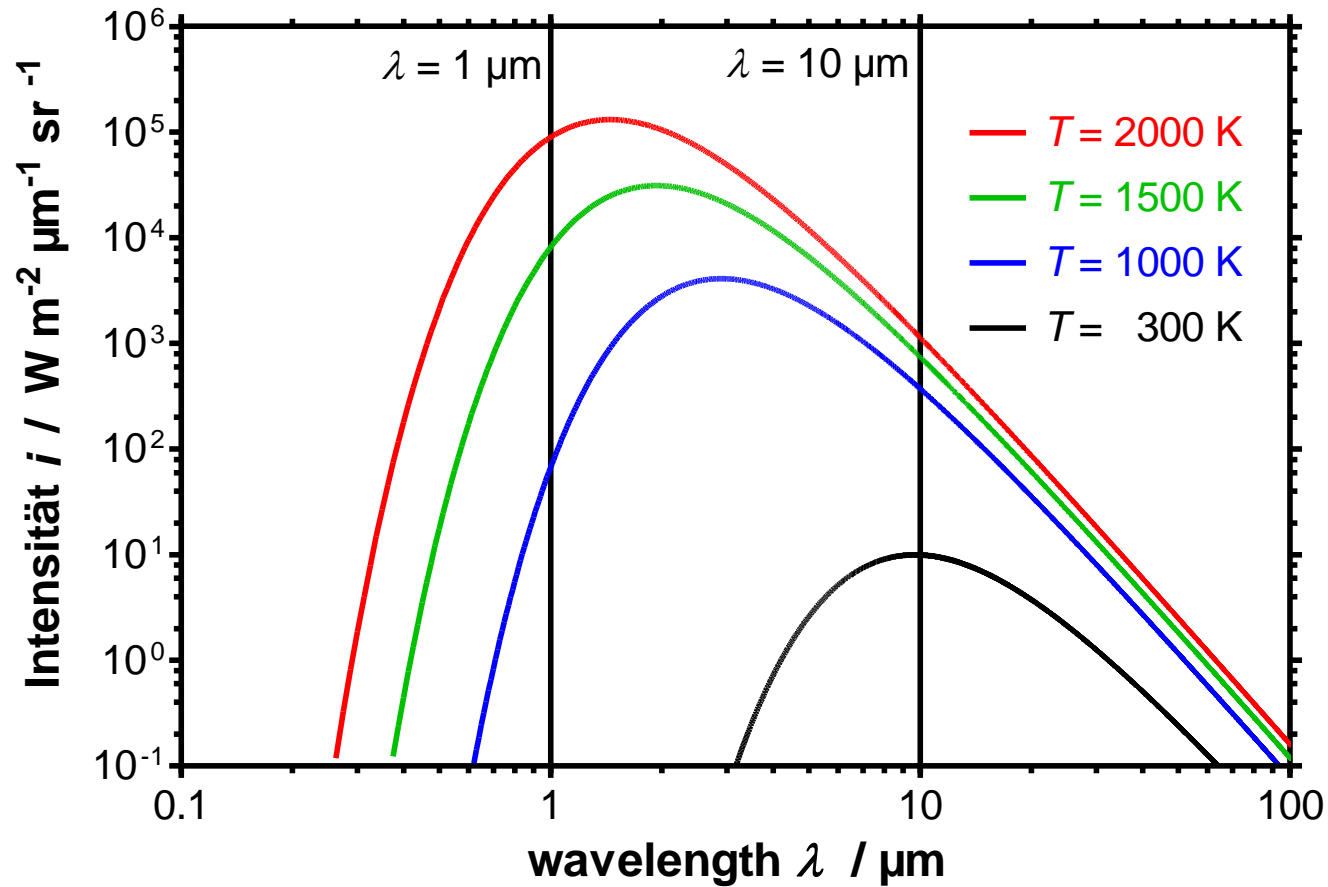
Messunsicherheit von 10 K

⇒ Erhöhung des Energieverbrauchs  
um 0.2 %

# WÄRMEABSTRAHLUNG EINES SCHWARZEN STRAHLERS



ZAE BAYERN  
Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung



## Relevante Wellenlängenbereiche

hohe Temperaturen:  
NIR ( $\sim 1 \mu\text{m}$ )

Raumtemperatur:  
LWIR ( $\sim 10 \mu\text{m}$ )

**Problem:**  
TBCs sind  
semi-transparent  
in NIR

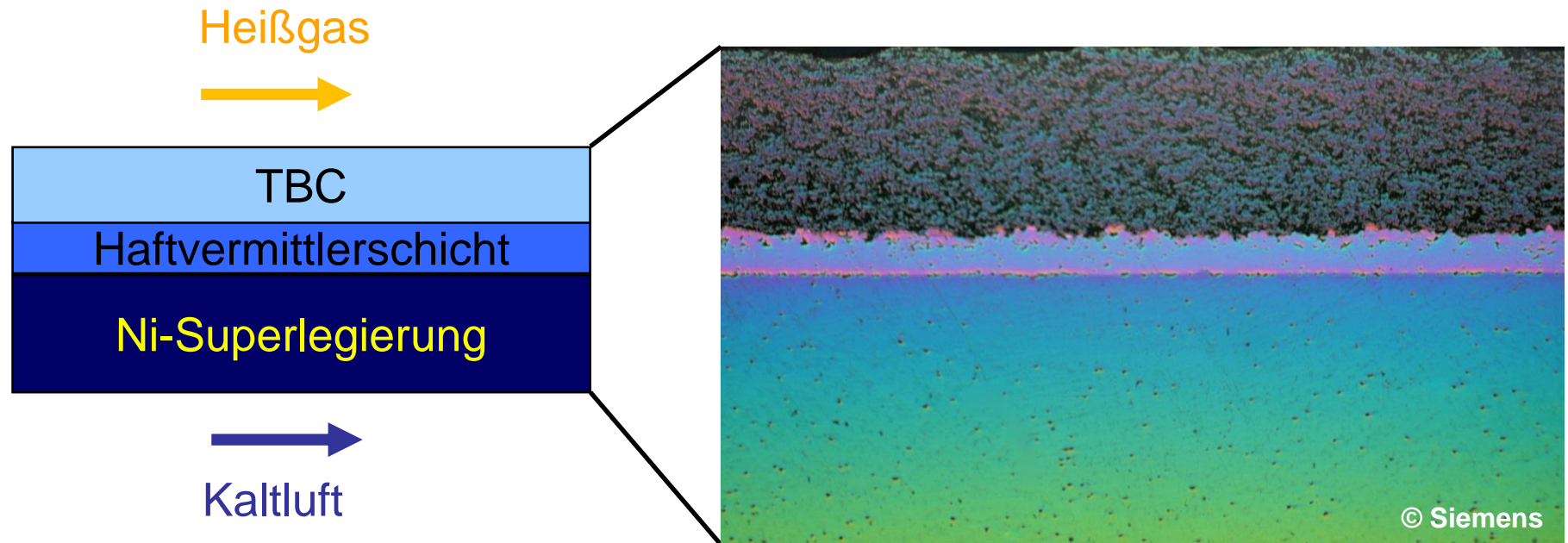


# KERAMISCHE WÄRMEDÄMMSCHICHTEN (THERMAL BARRIER COATINGS)



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung



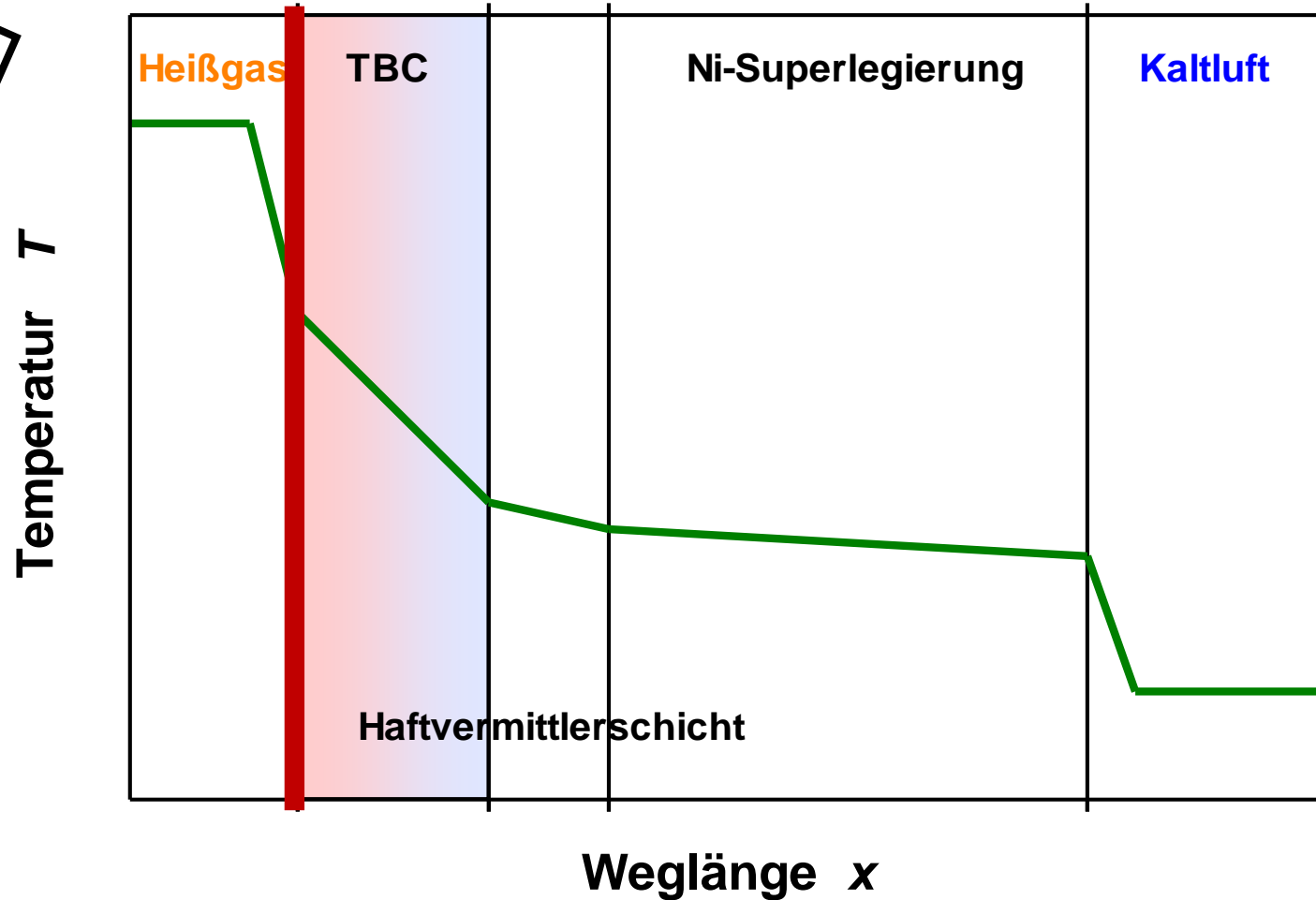
# WÄRMEDURCHGANG DURCH EINE WÄRMEDÄMMSCHICHT (TBC)



ZAE BAYERN  
Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

Pyrometer

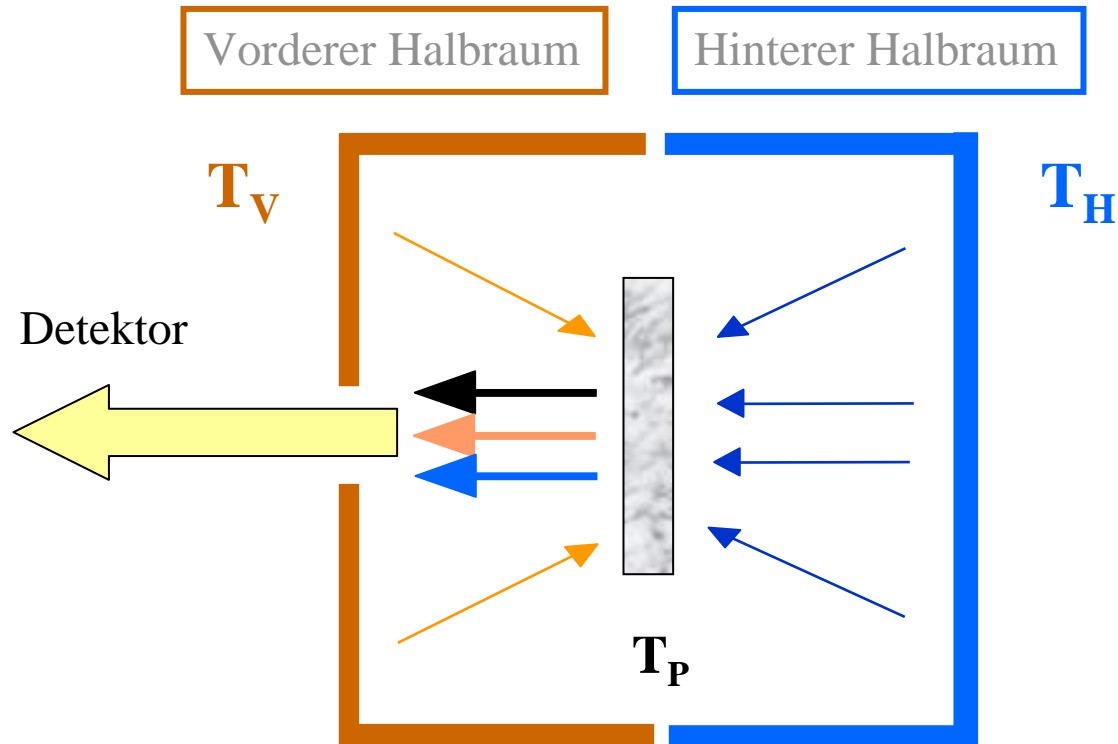
## Temperaturprofil



# BLACKBODY BOUNDARY CONDITIONS APPARATUR (BBC)



ZAE BAYERN  
Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung



**Emission**

**Reflexion**

**Transmission**

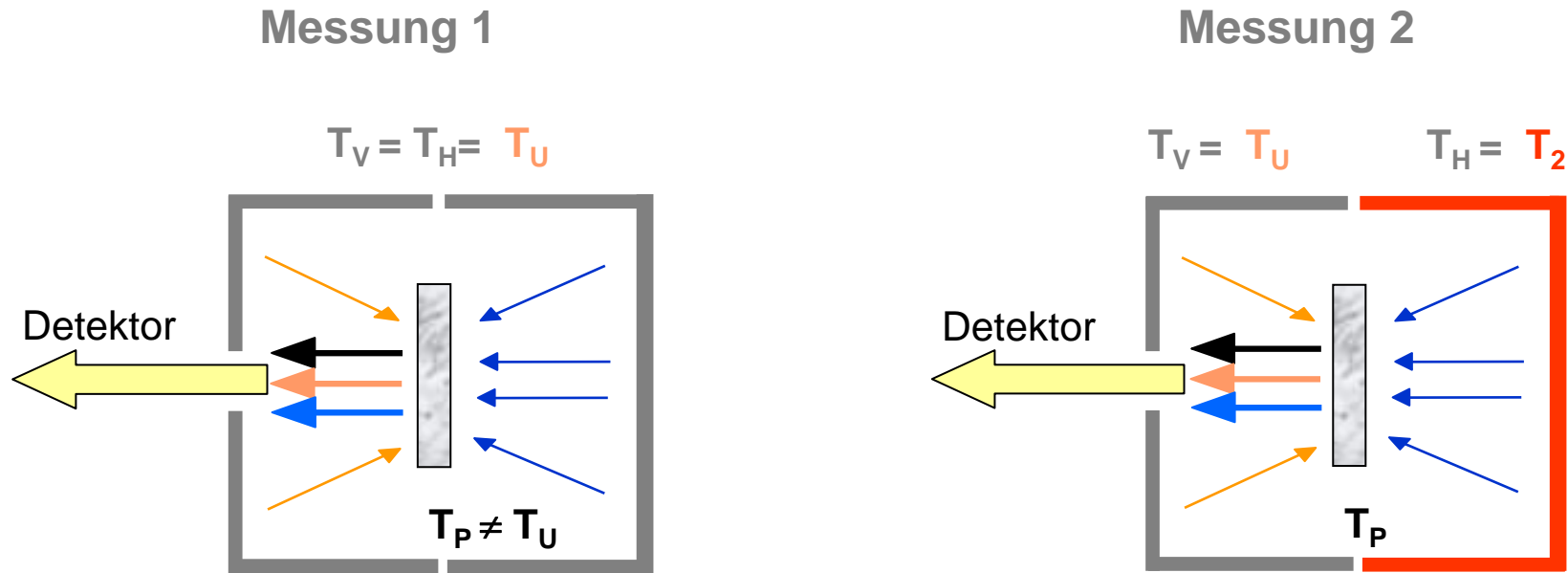
$$i_{\text{Messung}}(T_P, T_V, T_H) = \overbrace{\varepsilon(T_P) \cdot I_S(T_P)}^{\text{Emission}} + \overbrace{\rho(T_P) \cdot I_S(T_V)}^{\text{Reflexion}} + \overbrace{\tau(T_P) \cdot I_S(T_H)}^{\text{Transmission}}$$



# BLACKBODY BOUNDARY CONDITIONS APPARATUR (BBC)



ZAE BAYERN  
Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung



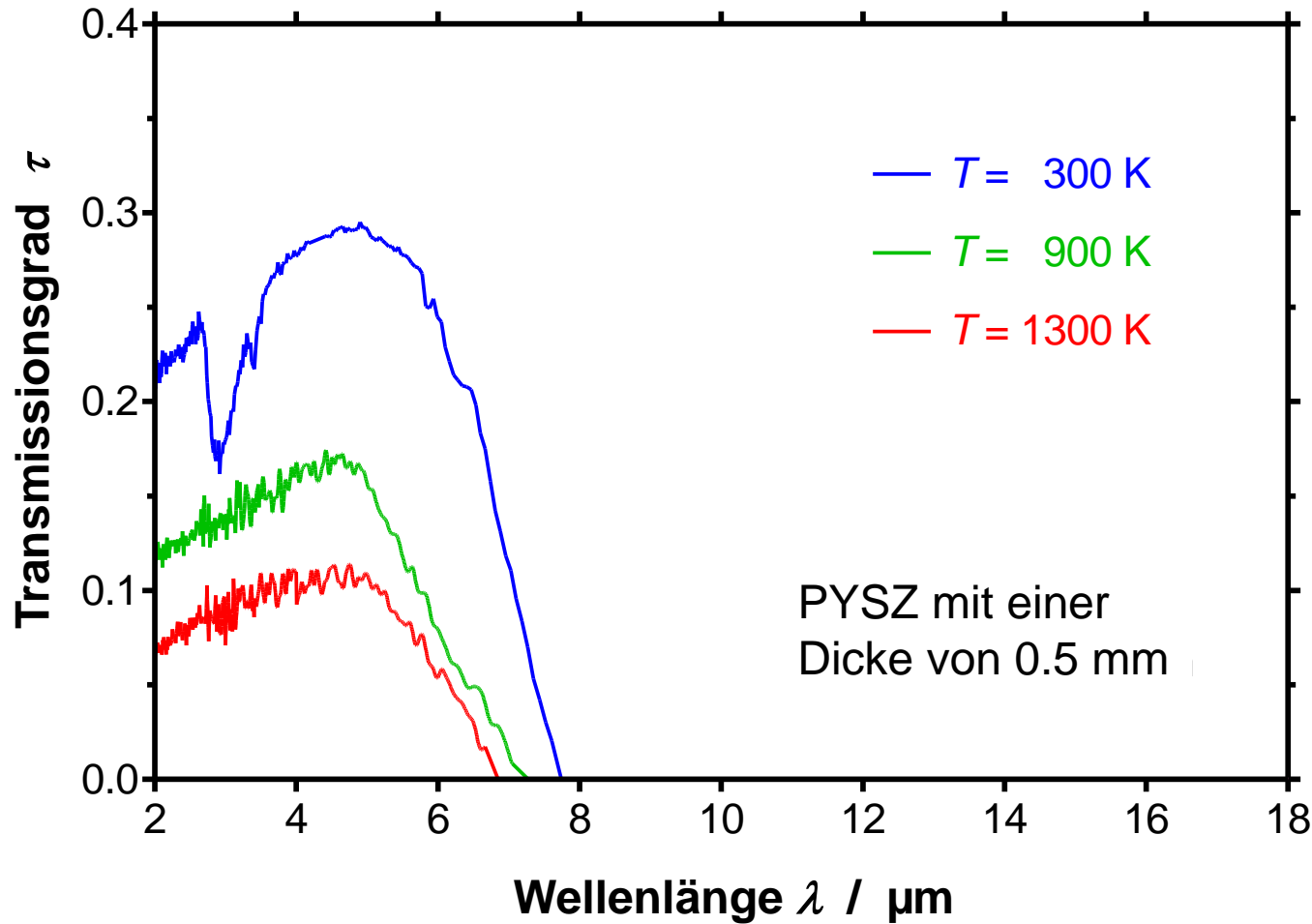
$$(1) \quad i_{\text{Messung 1}}(T_P, T_U) = \underbrace{\varepsilon(T_P) \cdot I_S(T_P)}_{\text{Emission}} + \underbrace{\rho(T_P) \cdot I_S(T_U)}_{\text{Reflexion}} + \underbrace{\tau(T_P) \cdot I_S(T_U)}_{\text{Transmission}}$$

$$(2) \quad i_{\text{Messung 2}}(T_P, T_U, T_2) = \underbrace{\varepsilon(T_P) \cdot I_S(T_P)}_{\text{Emission}} + \underbrace{\rho(T_P) \cdot I_S(T_U)}_{\text{Reflexion}} + \underbrace{\tau(T_P) \cdot I_S(T_2)}_{\text{Transmission}}$$

# TRANSMISSIONSGRAD VON TEILSTABILISIERTEM ZIRKONOXID (PYSZ)



ZAE BAYERN  
Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

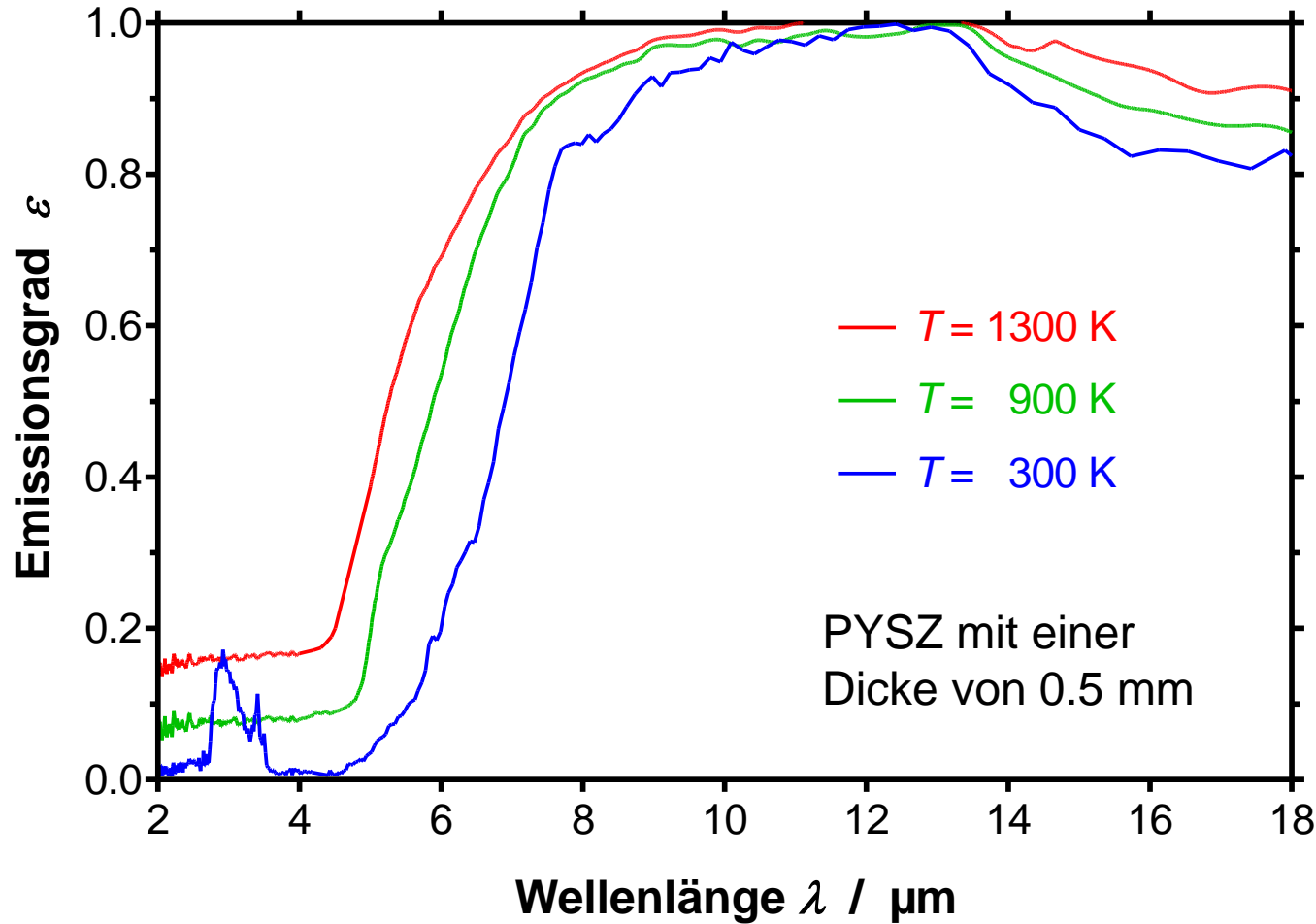


semi-transparent  
bei Wellenlängen  
bis ca. 8  $\mu\text{m}$

# EMISSIONSGRAD VON TEILSTABILISIERTEM ZIRKONOXID (PYSZ)



ZAE BAYERN  
Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung



hoher Emissionsgrad  
im LWIR

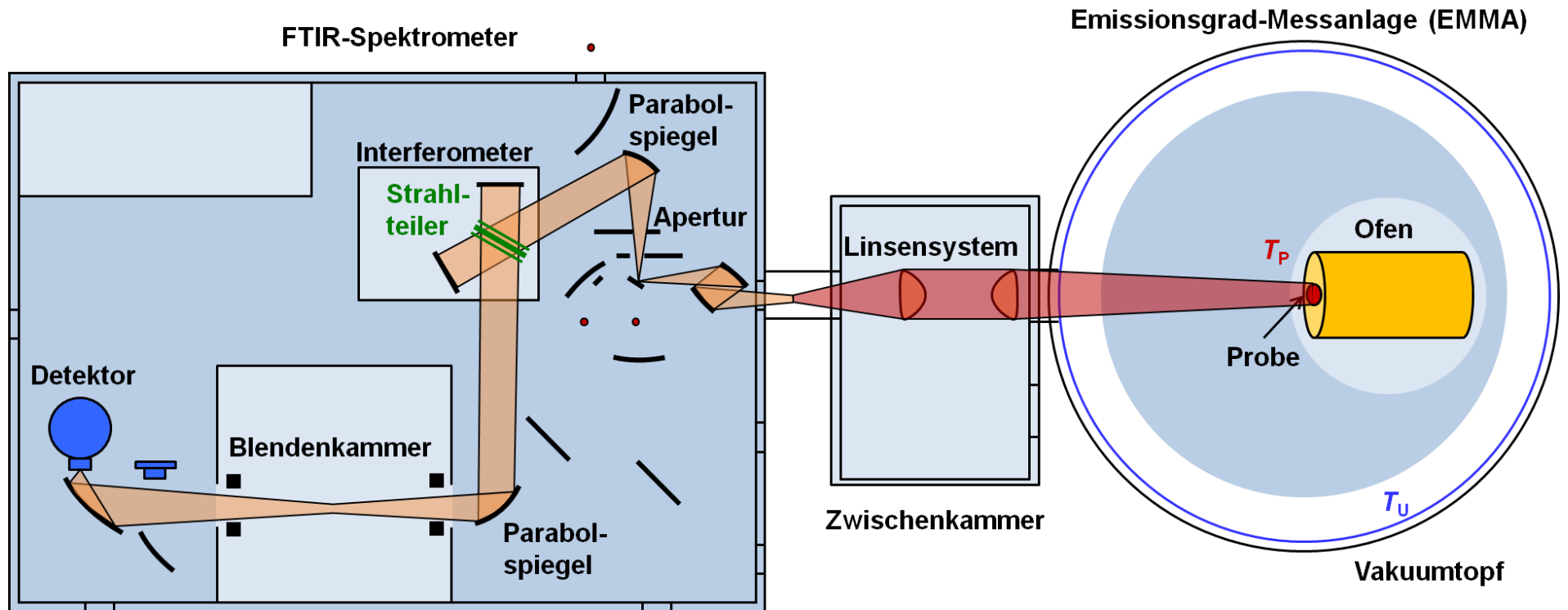
Christiansen  
Wellenlänge  
bei  $13 \mu\text{m}$

# EMISSIONSGRADMESSANLAGE (EMMA)



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

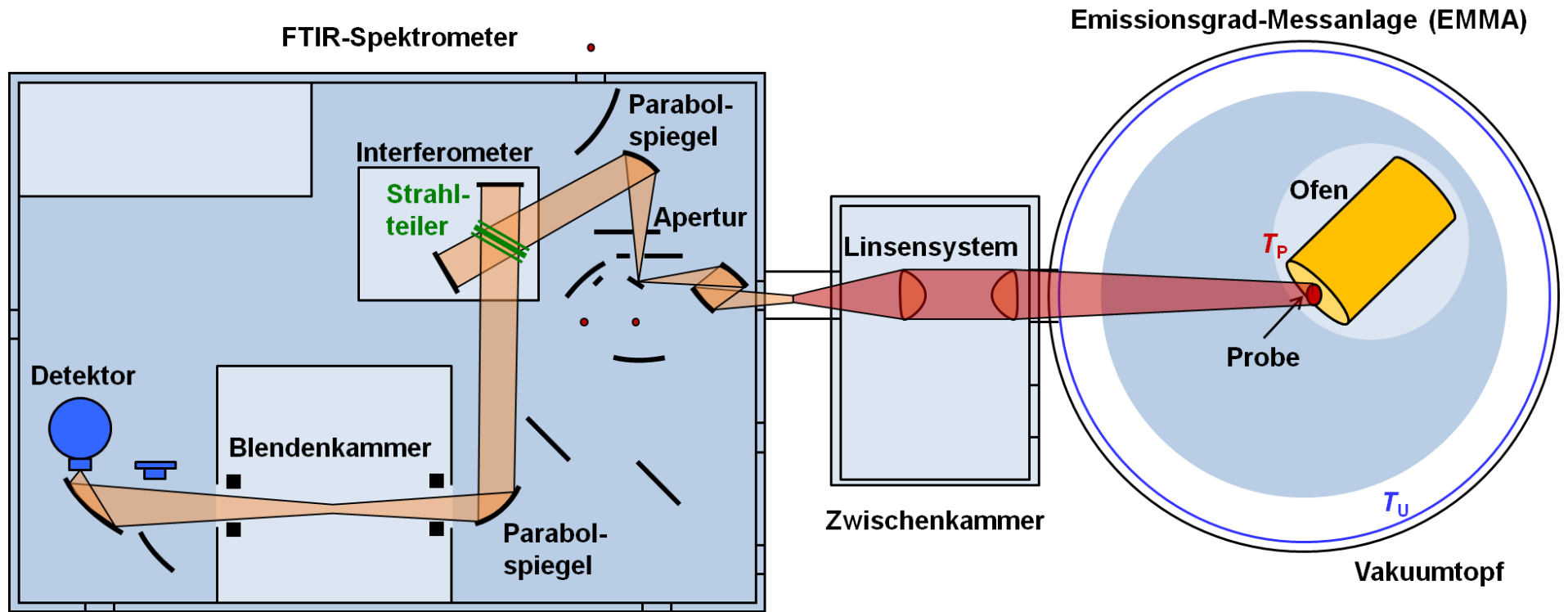


# EMISSIONSGRADMESSANLAGE (EMMA)



ZAE BAYERN

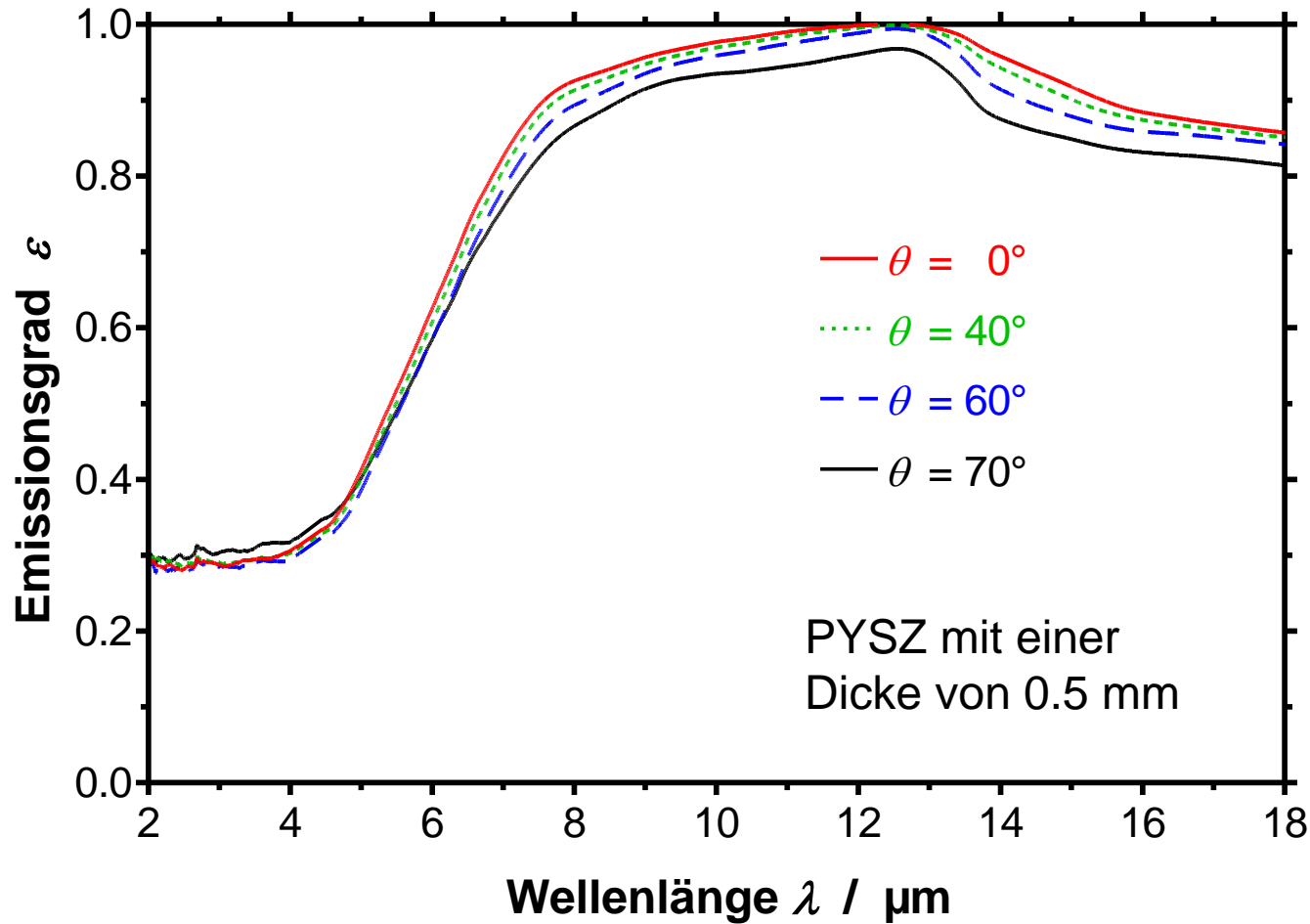
Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung



# EMISSIONSGRAD VON TEILSTABILISIERTEM ZIRKONOXID (PYSZ)



ZAE BAYERN  
Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung



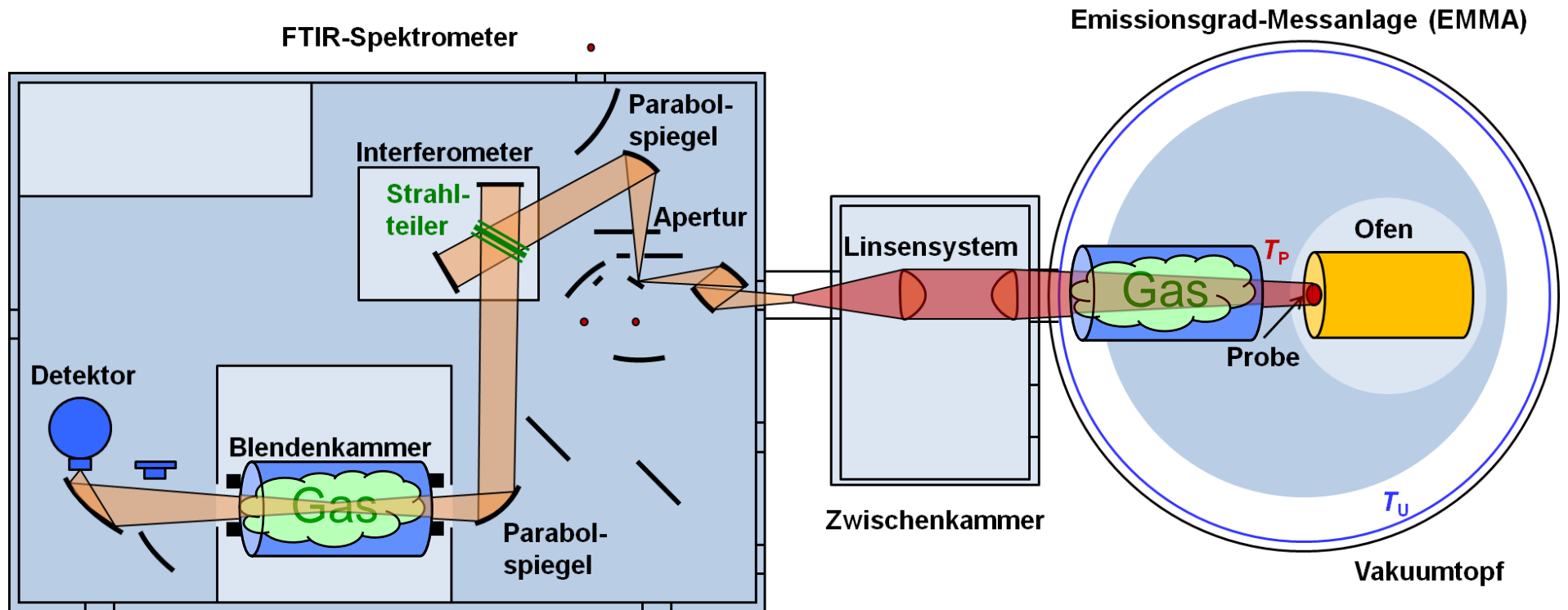
geringe Abhängigkeit  
vom Abstrahlwinkel  
bis zu Winkeln  
von  $60^\circ$

# EINBAU DER GASMESSZELLE ZUR MESSUNG



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung



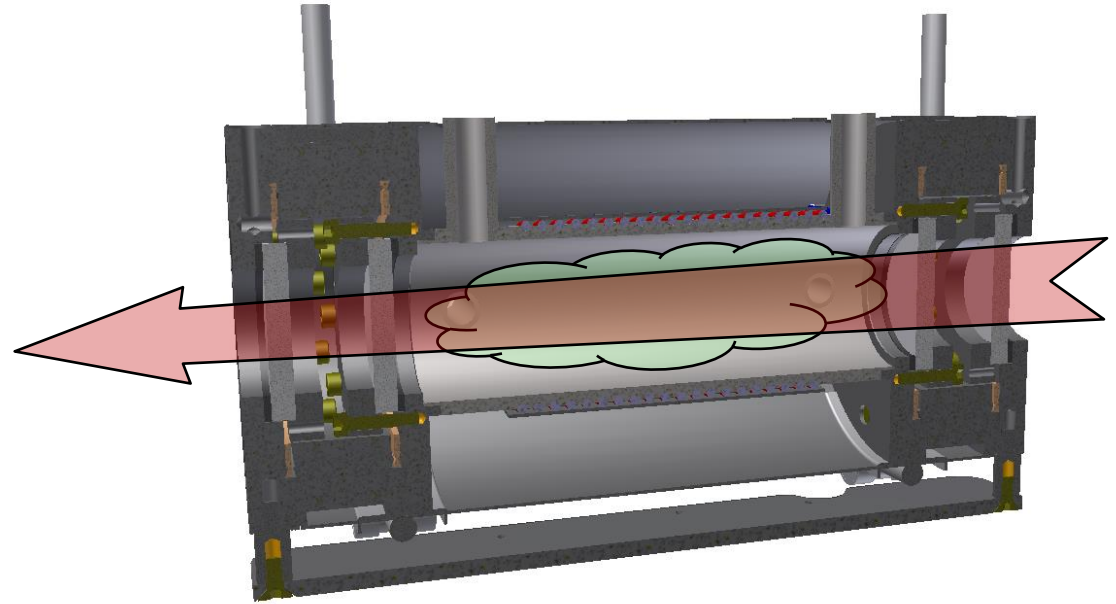


# GASMESSZELLE



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

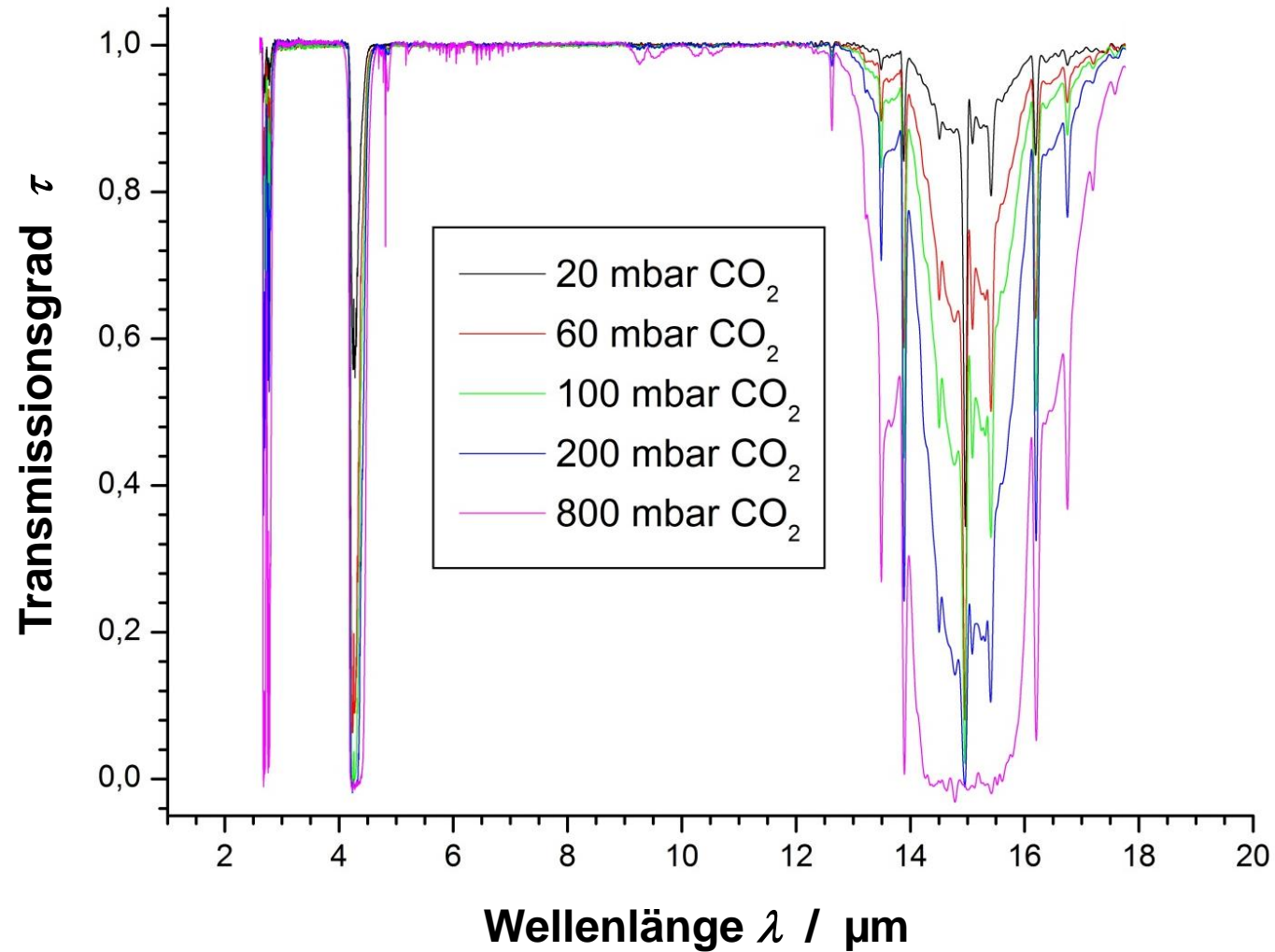


# TRANSMISSIONSGRAD VON CO<sub>2</sub>



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

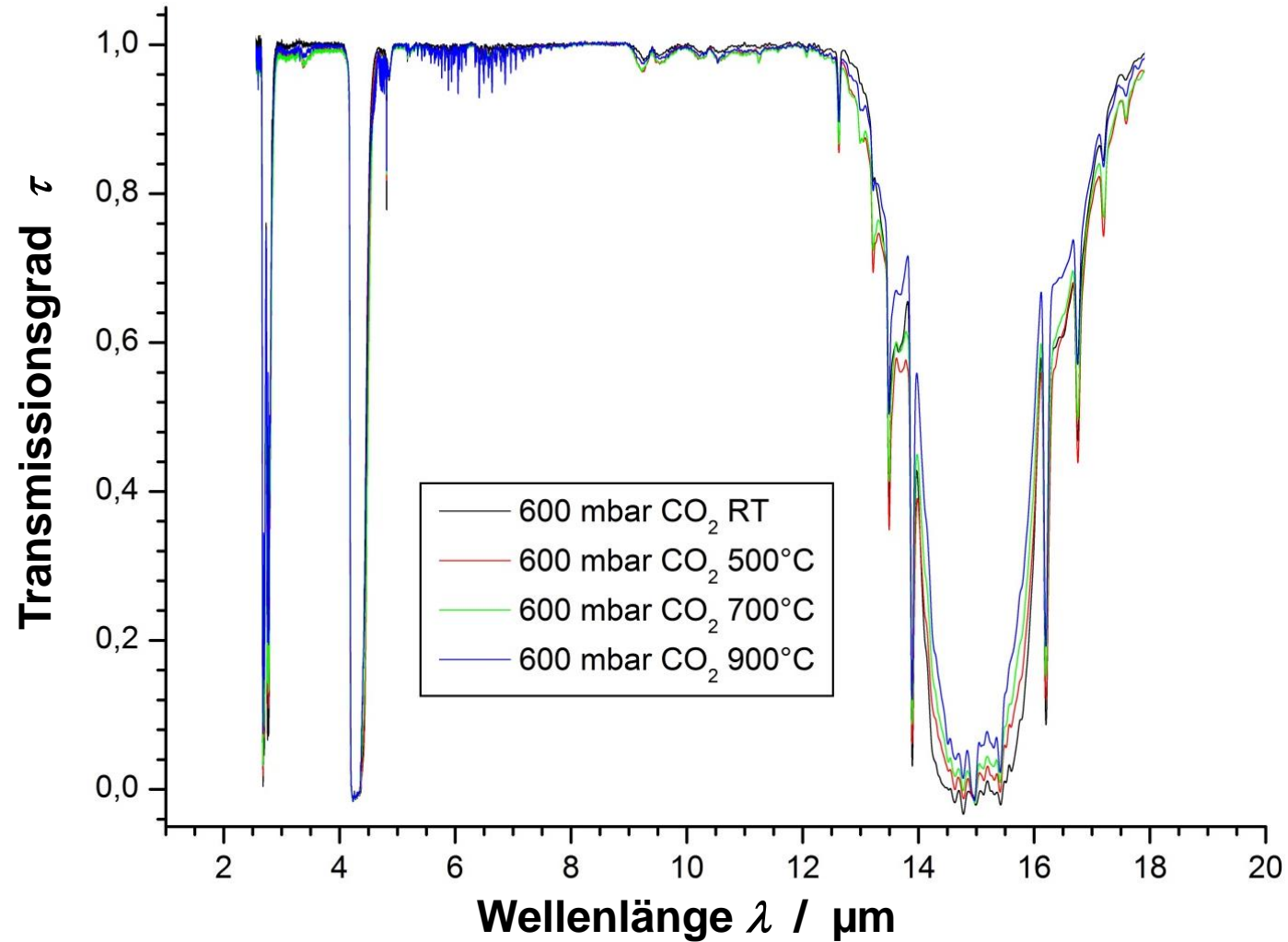


# TRANSMISSIONSGRAD VON CO<sub>2</sub>



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung



# TRANSMISSIONSGRAD DES VERBRENNUNGSGASES

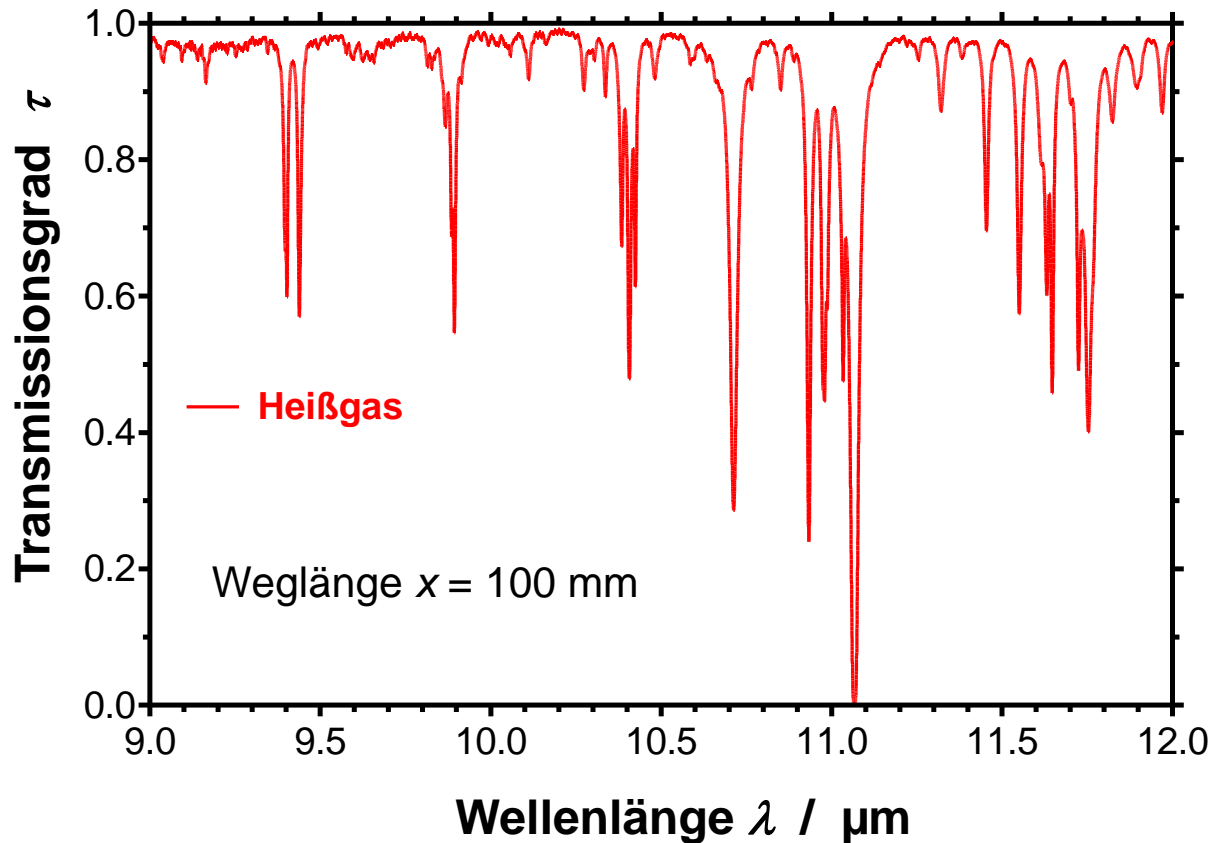


**ZAE BAYERN**  
Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

## Verbrennungsgas

- Temperatur  $T = 1600 \text{ K}$
- Druck  $p = 13 \text{ bar}$

Gas	Anteil
$\text{N}_2$	75 %
$\text{O}_2$	10 %
$\text{H}_2\text{O}$	10 %
$\text{CO}_2$	5 %

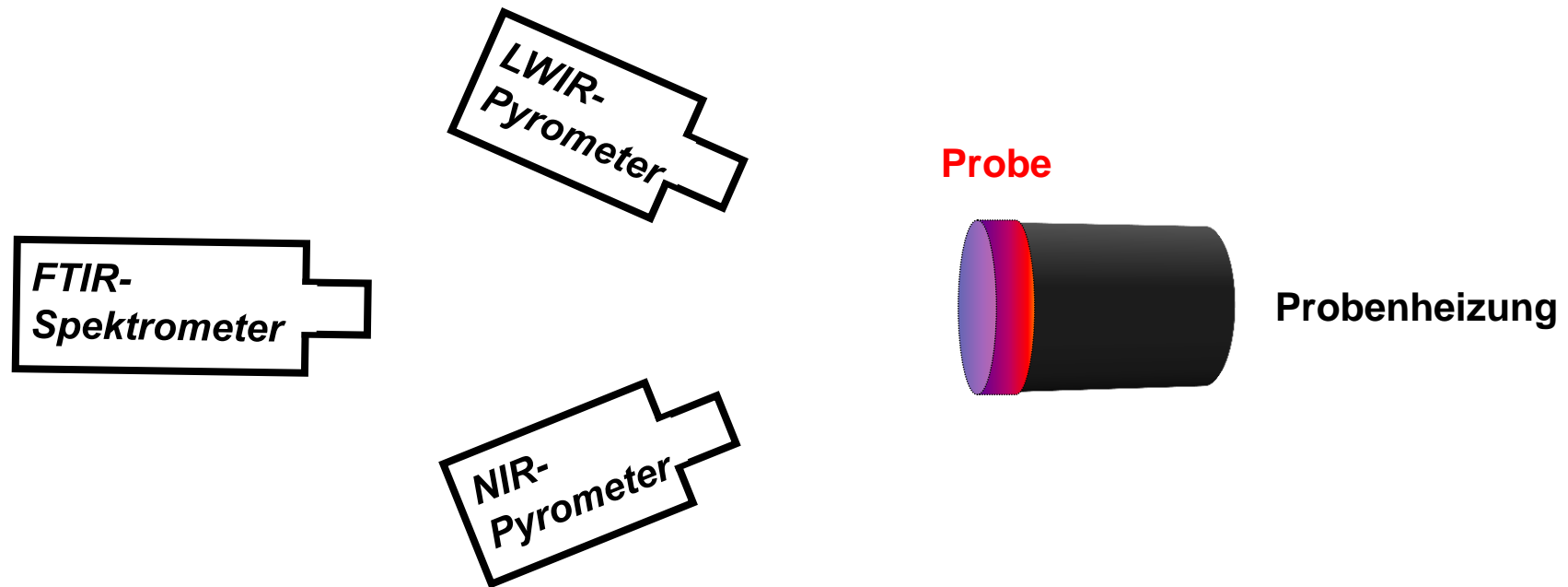


# TESTMESSUNG AN EINER RÜCKSEITIG BEHEIZTEN TBC-PROBE



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung



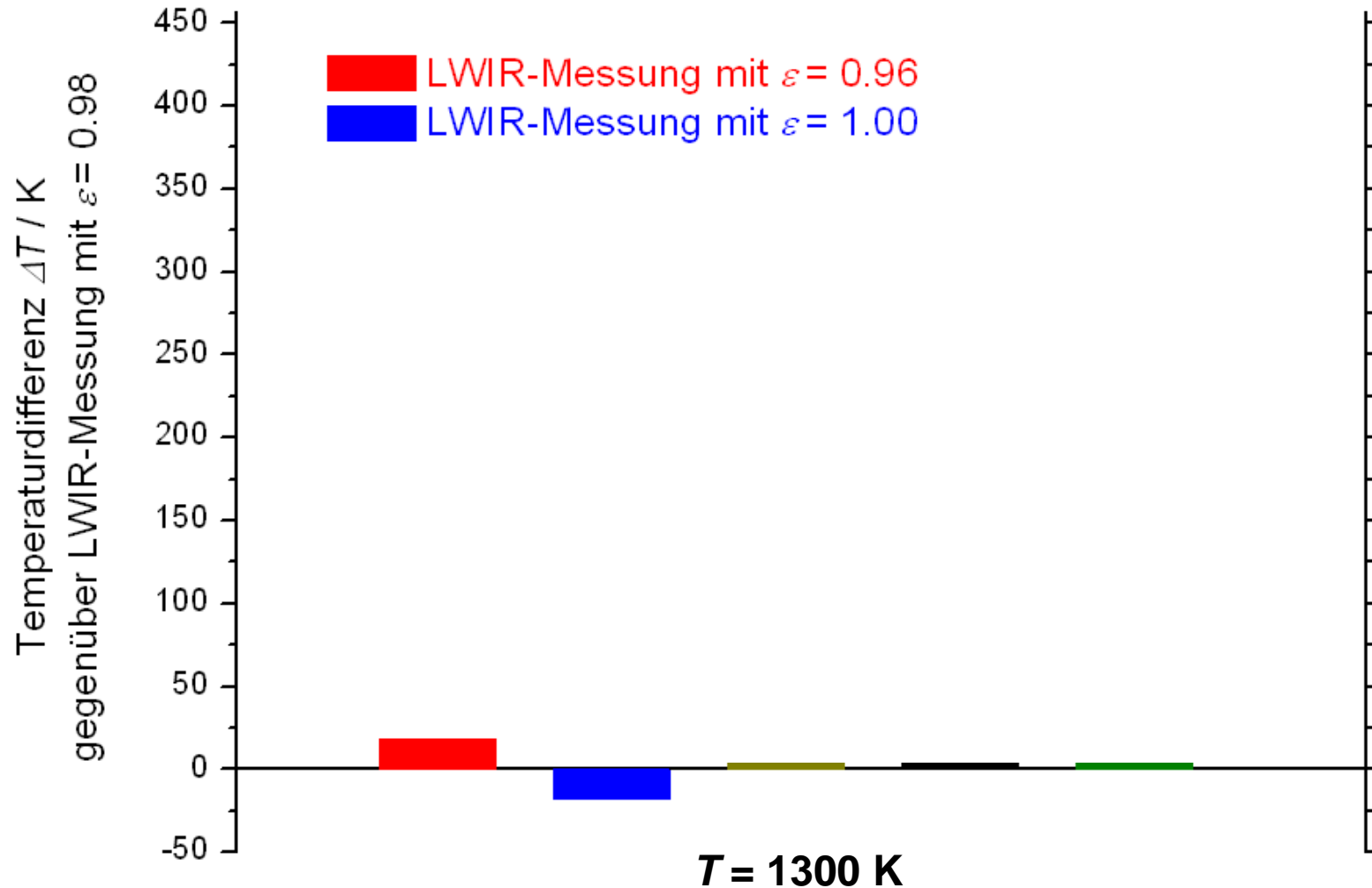
# TESTMESSUNG AN EINER RÜCKSEITIG BEHEIZTEN TBC-PROBE



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

LWIR:  $\varepsilon = 0.98$

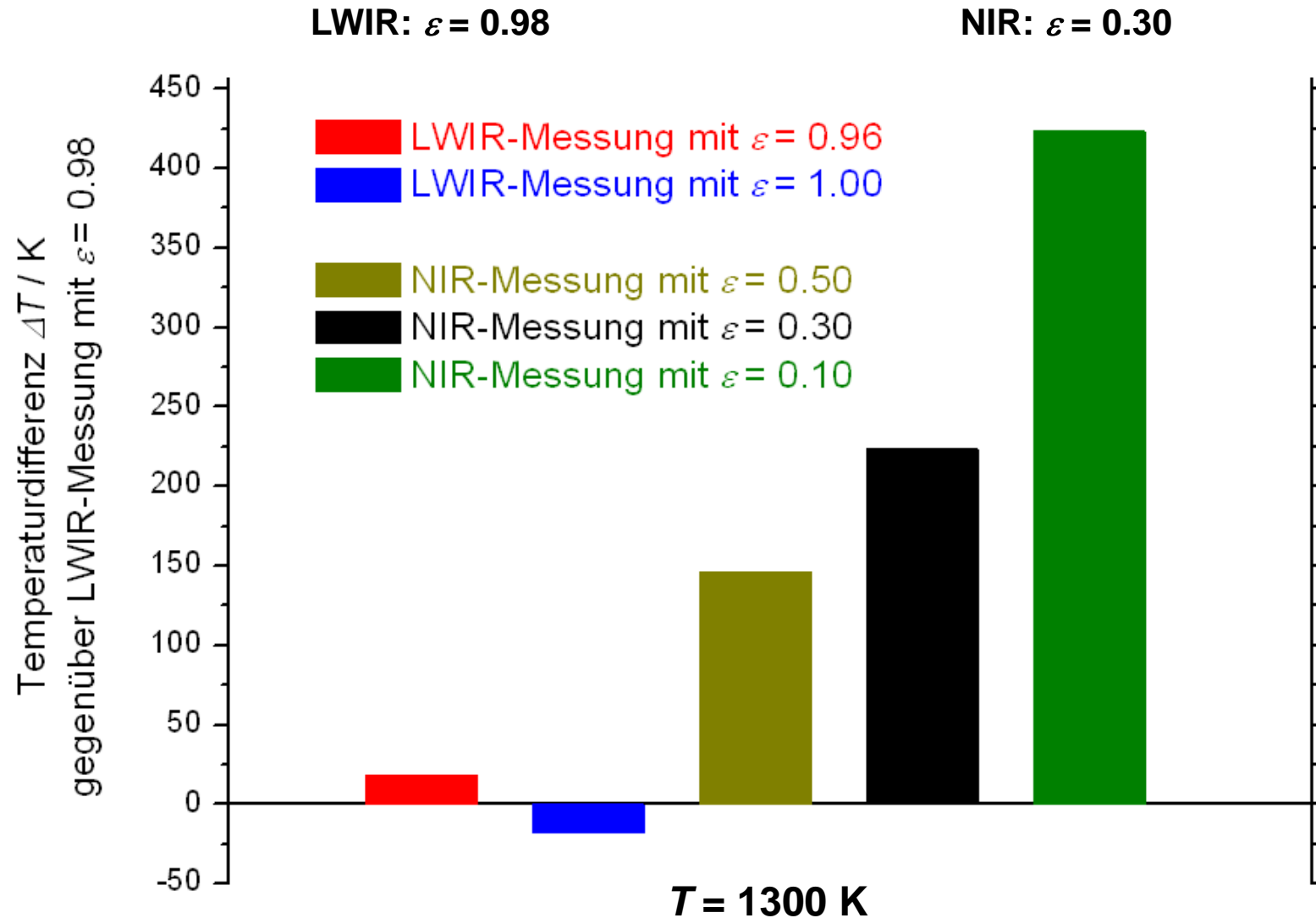


# TESTMESSUNG AN EINER RÜCKSEITIG BEHEIZTEN TBC-PROBE



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung





## Verwendete Charakterisierungsverfahren:

- Gasmesszelle
- Emissionsgradmessanlage (EMMA)
- Black Body Boundary Conditions Anlage (BBC)

## Optimale Wellenlängenbereiche:

- kurzwelliger Bereich bei opaken Schichten
- langwelliger Bereich bei semi-transparenten Schichten

# Vielen Dank!

MIT SONNE UND VERSTAND.

© ZAE Bayern

[jochen.manara@zae-bayern.de](mailto:jochen.manara@zae-bayern.de)



**ZAE BAYERN**

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung