

Bayerisches Zentrum für
Angewandte Energieforschung e.V.

IR-optische und strahlungsthermometrische Charakterisierung von Oberflächen und Gasen bei hohen Temperaturen

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

MIT SONNE UND VERSTAND.

© ZAE Bayern

Jahrestagung 2017 des
Arbeitskreises Thermophysik
Selb, 03.-04. April 2017



- **Motivation**
 - Erhöhung der Effizienz thermischer Prozesse
 - Zerstörungsfreie Prüfung von Schichtsystemen

- **IR-optische und strahlungsthermometrische Charakterisierung**
 - Infrarot-optische Kenngrößen, wie Emissionsgrad, Transmissionsgrad, etc.
 - berührungslose Temperaturbestimmung an Oberflächen und Gasen

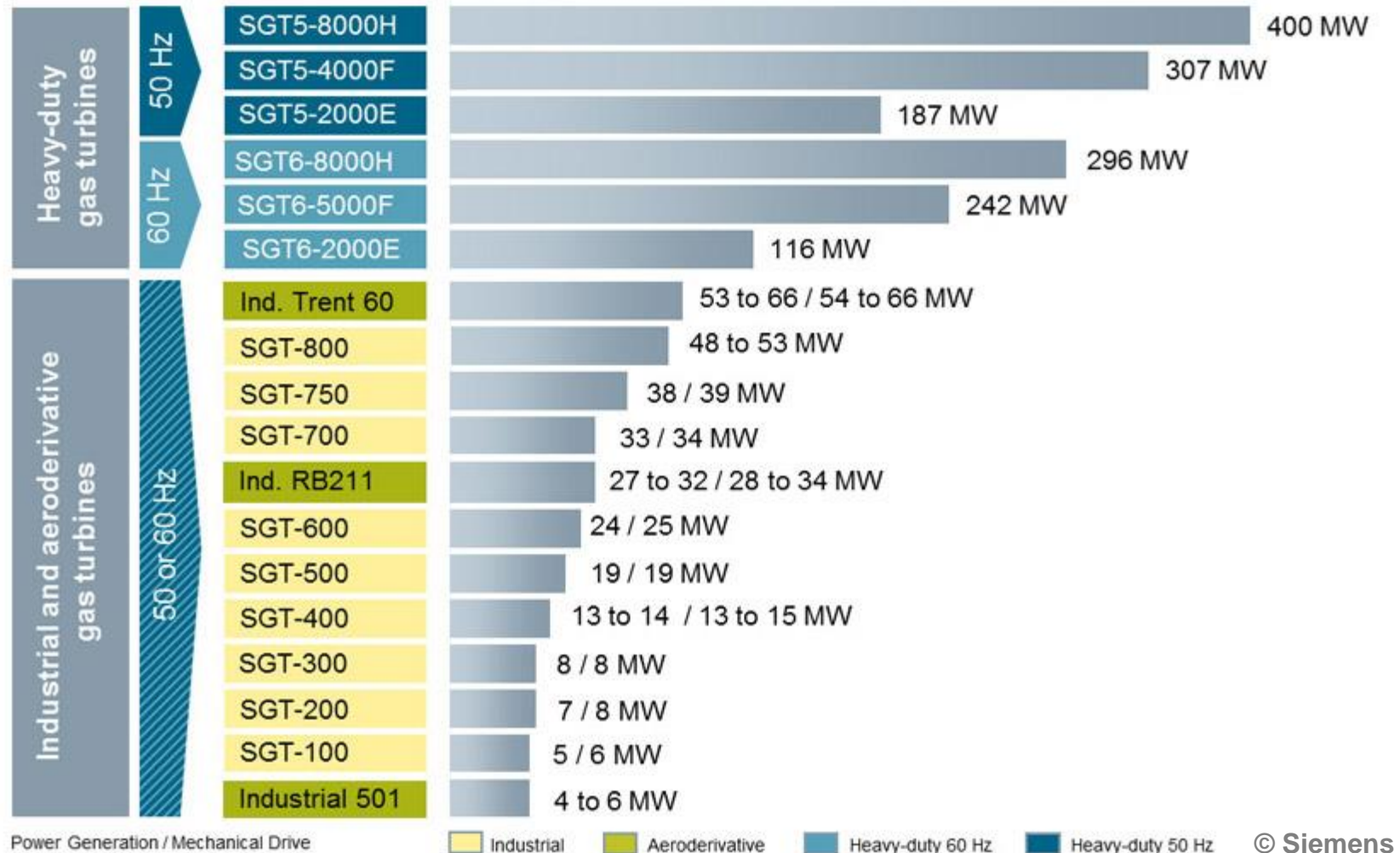
- **Zusammenfassung und Ausblick**
 - Hochtemperatur-Messverfahren zur IR-optischen Charakterisierung
 - Untersuchungen von Gasen, Oberflächen und Schichtsystemen

MOTIVATION



ZAE BAYERN
Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung

Siemens-Gasturbinen: Übersicht

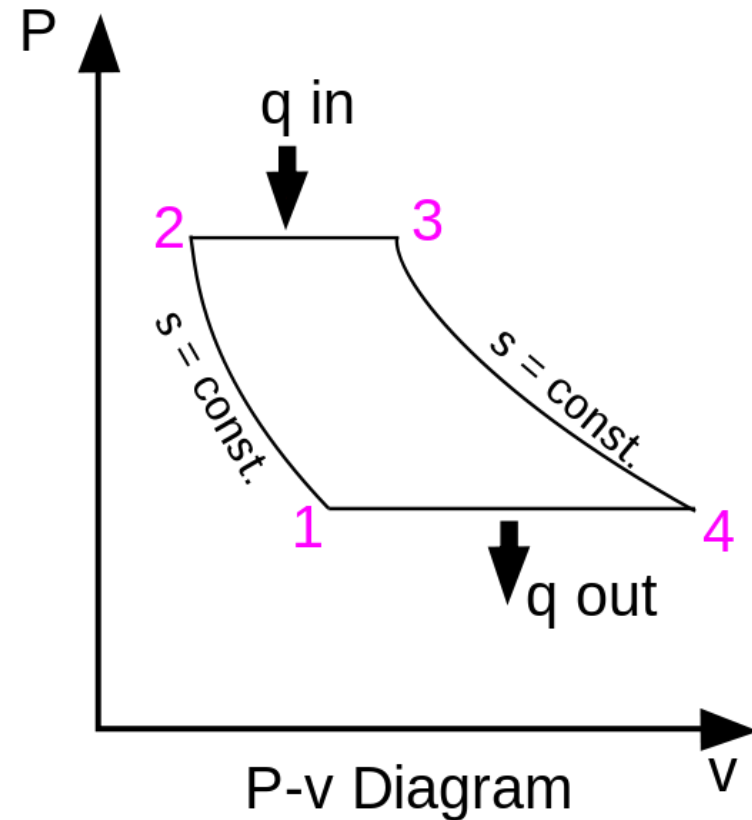
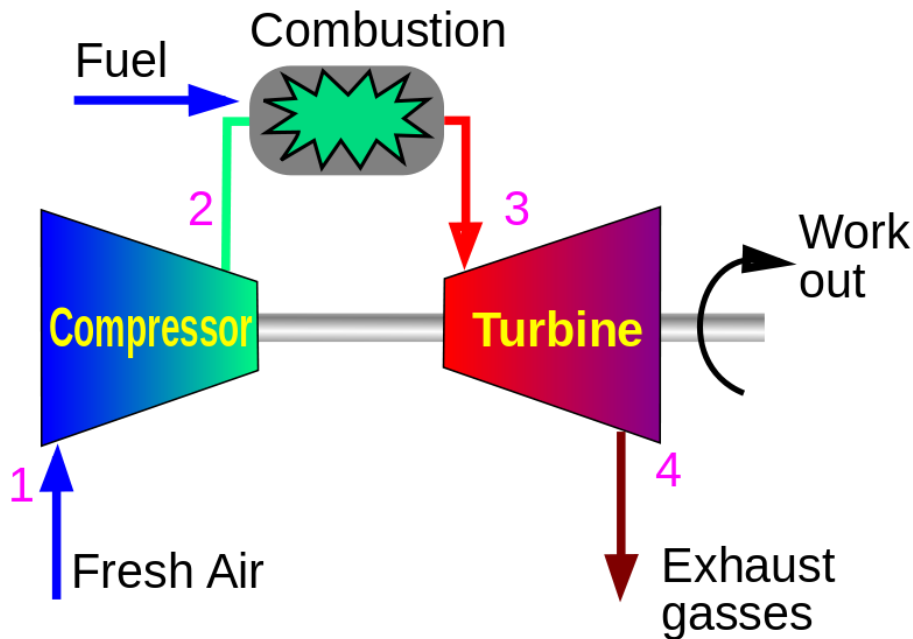


MOTIVATION



Wirkungsgrad

$$\eta_{\text{th,Brayton}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{T_4}{T_3}$$



MOTIVATION



ZAE BAYERN
Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung

1. Erhöhung der Temperatur

Einsatz keramischer Wärmedämmschichten (TBCs) zur Erhöhung der Betriebstemperatur.

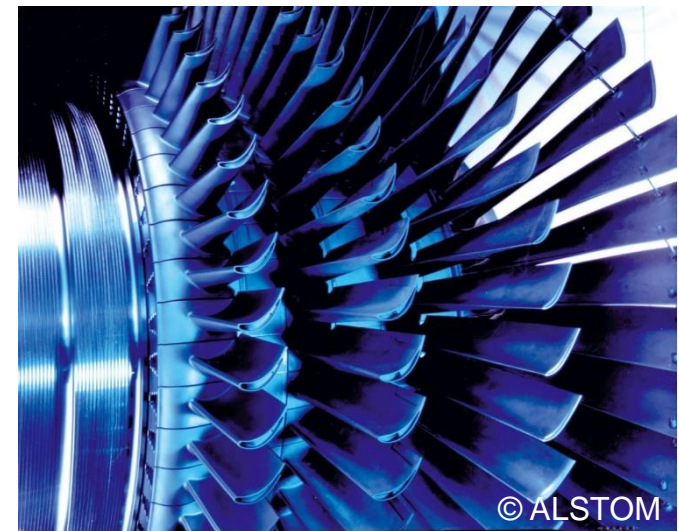
2. Exakte Bestimmung der Temperatur

Verminderung der Messunsicherheit um 5 K

⇒ Reduktion des Energieverbrauchs
um 1.2 %

3. Erhöhung der Schichtstabilität

Zerstörungsfreie Schadenserkennung



MOTIVATION



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung



© Siemens

EU-Projekt STARGATE:

Sensors towards advanced Monitoring
and Control of Gas Turbine Engines

BMW-Projekt OptiTBCs:

Wärmedämmschichten mit optimierten
Haftungseigenschaften
für energieeffiziente Kraftwerksturbinen

Infrarot-optische und strahlungsthermometrische Charakterisierungen:

- Bestimmung der IR-optischen Eigenschaften der TBCs
- Bestimmung der IR-optischen Eigenschaften der Heißgase
- Strahlungsthermometrische Messungen in der Gasturbine

Zerstörungsfreie Schichtcharakterisierung:

- Bestimmung der Haftungseigenschaften von TBCs

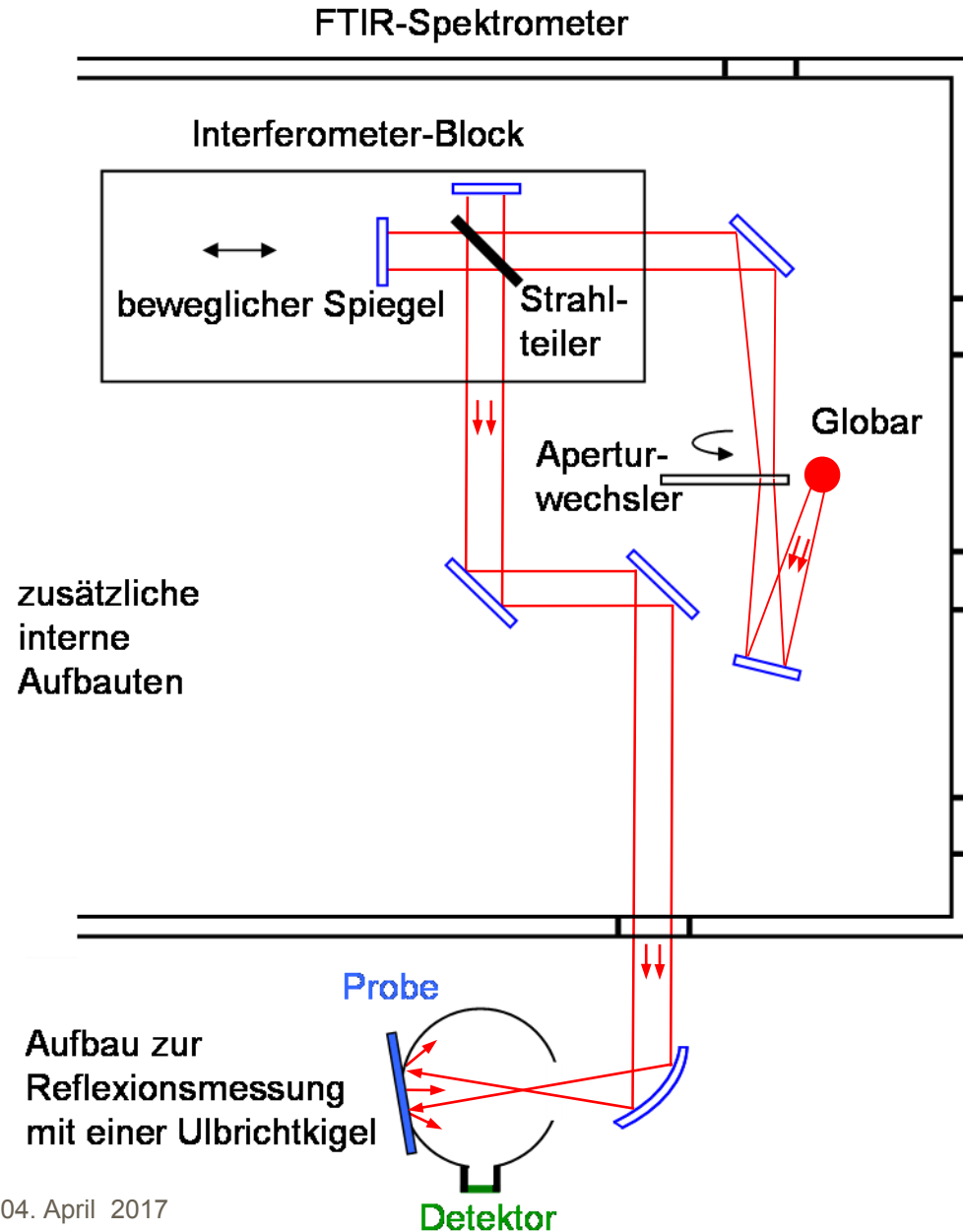
ULBRICHTKUGEL

Bestimmung der
infrarot-optischen
Eigenschaften
bei Raumtemperatur



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung

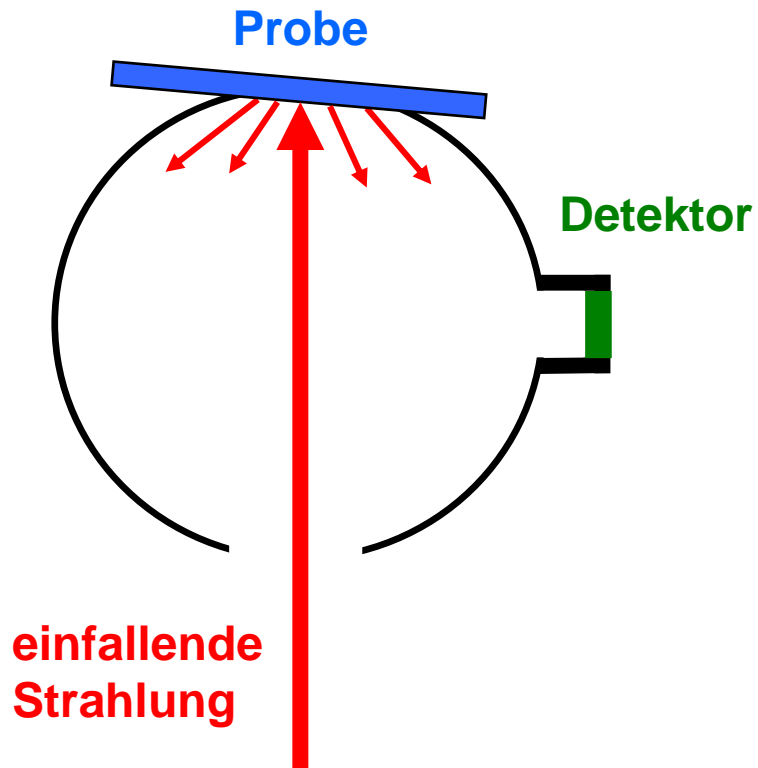


ULBRICHTKUGEL

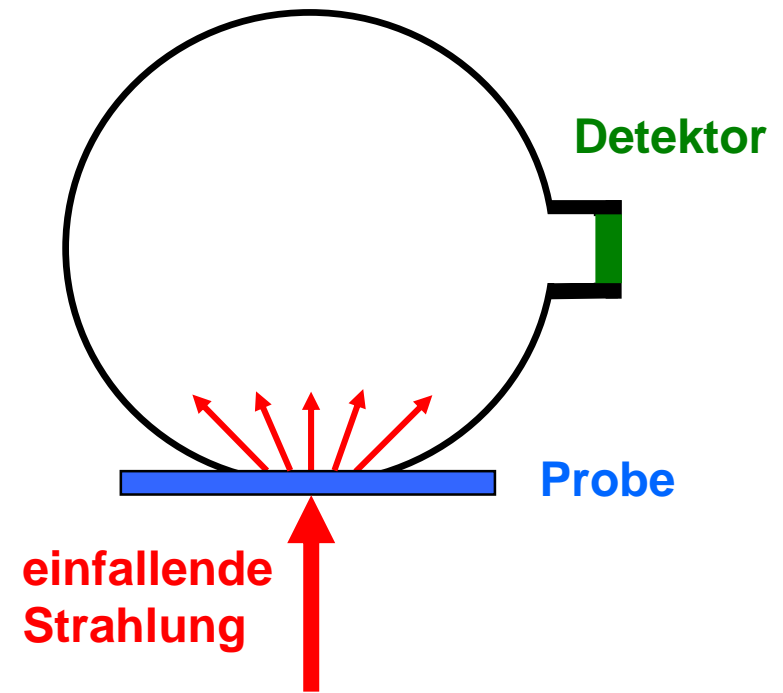


ZAE BAYERN
Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung

Bestimmung von Reflexionsgrad und Transmissionsgrad



Reflexionsmessung



Transmissionsmessung

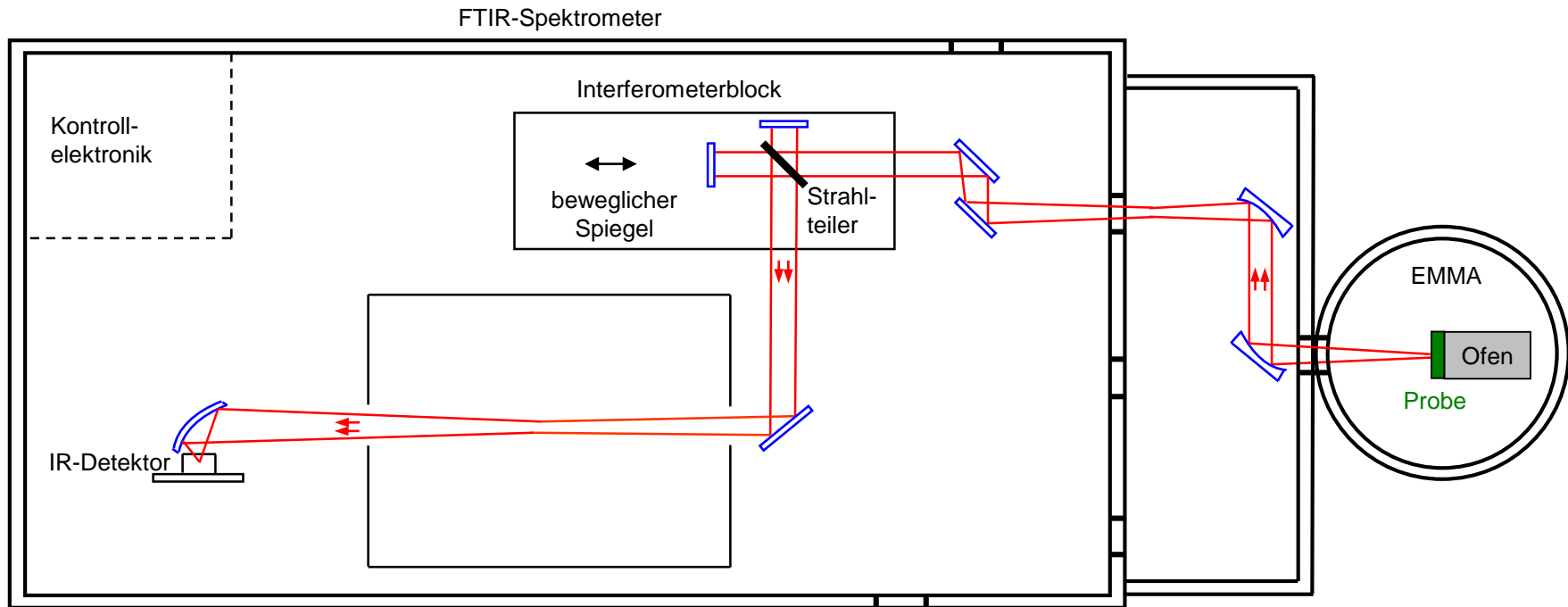
EMISSIONSGRAD-MESSANLAGE (EMMA)



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung

Bestimmung des Emissionsgrades bei hohen Temperaturen



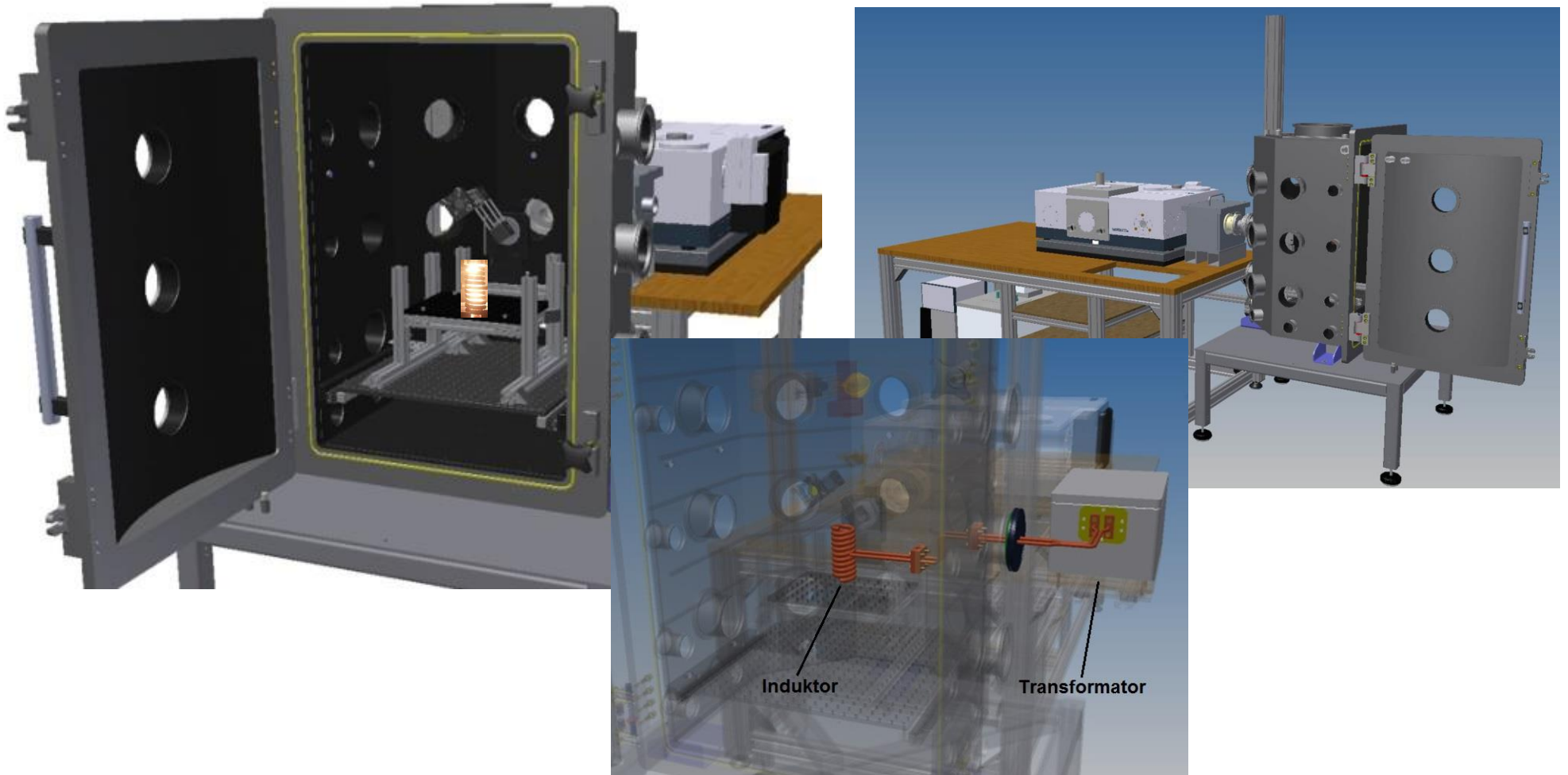
EMISSIONSGRAD-MESSANLAGE (EMMA)



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung

Messaufbau im Vakuumbehälter mit Schwarzkörper-Umgebung



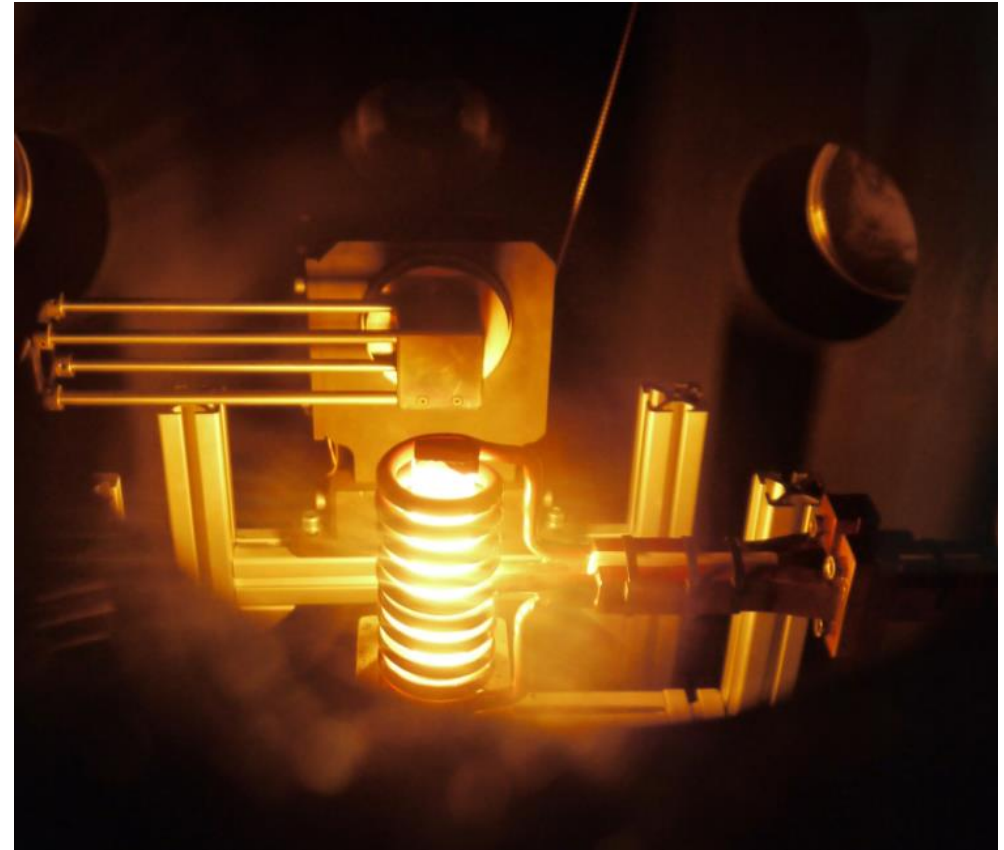
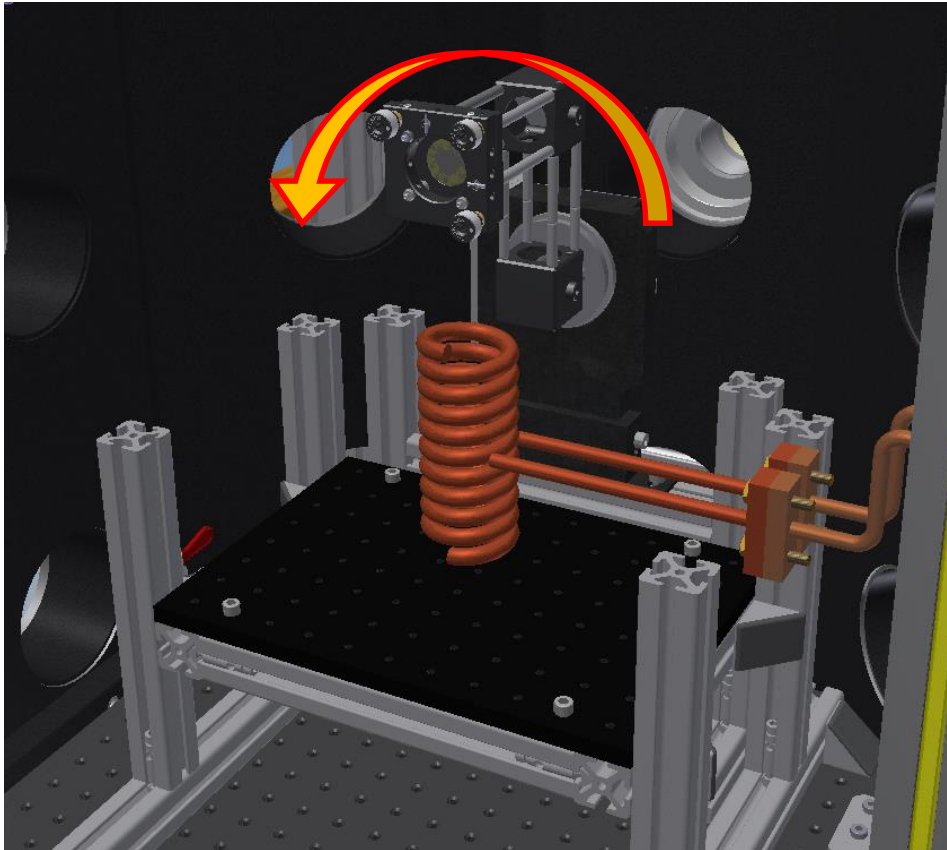
EMISSIONSGRAD-MESSANLAGE (EMMA)



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung

Durchführung winkelabhängiger Messungen mittels Spiegelarm

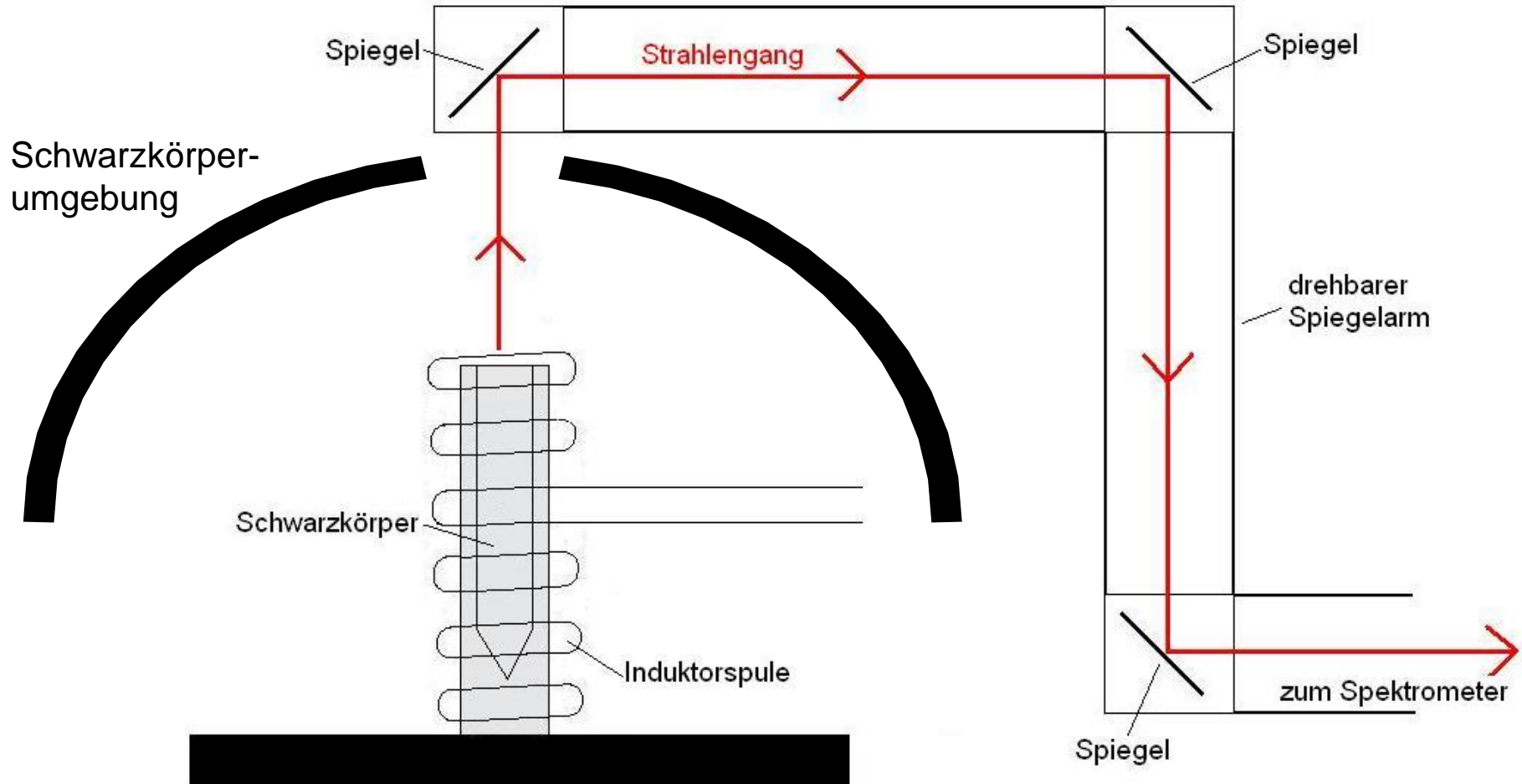


EMISSIONSGRAD-MESSANLAGE (EMMA)



ZAE BAYERN
Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung

Kalibrierung mit einem Schwarzkörper-Referenzstrahler



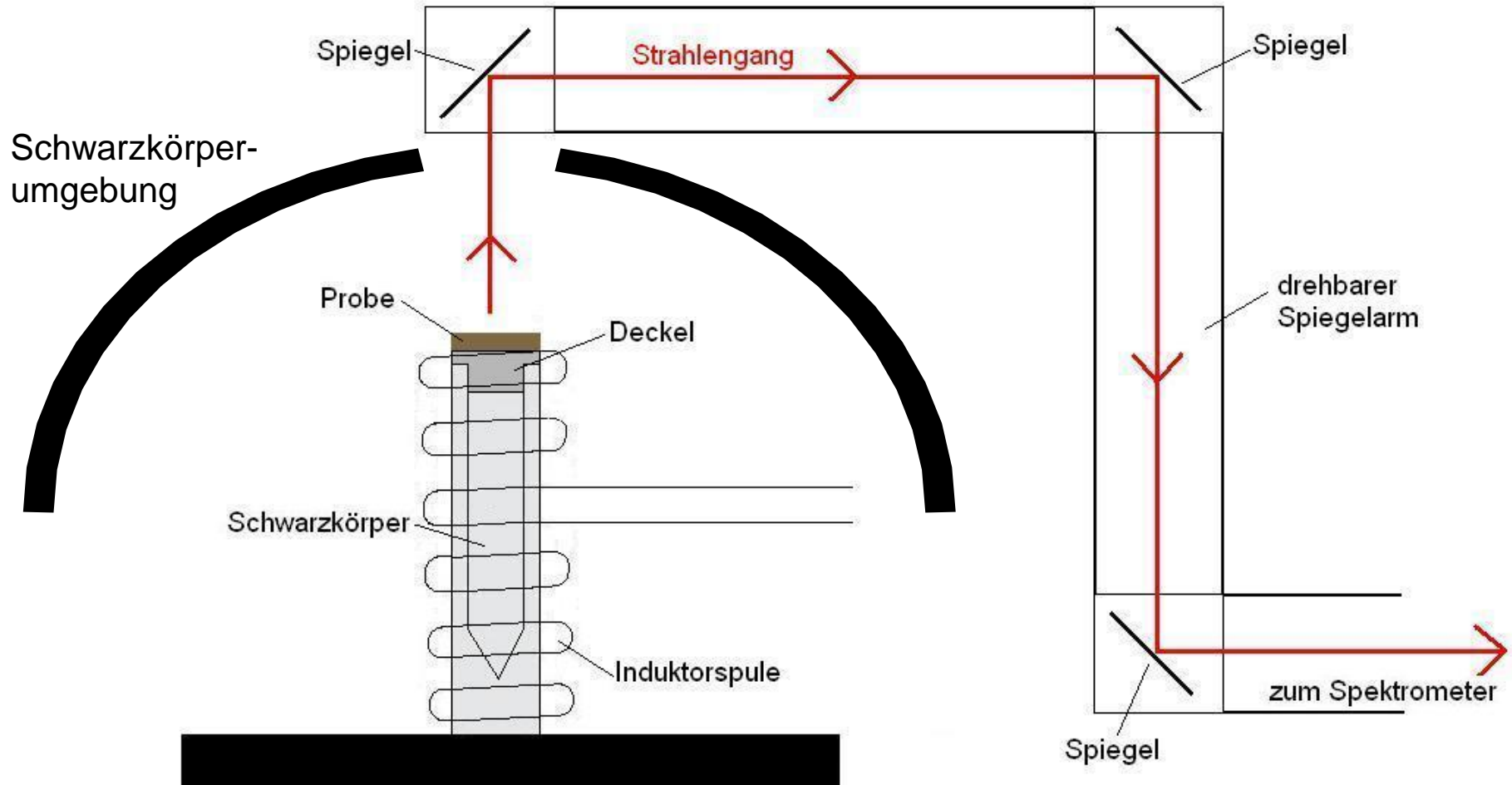
EMISSIONSGRAD-MESSANLAGE (EMMA)



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung

Probenheizung mittels Induktion oder Graphitkörper



EMISSIONSGRAD-MESSANLAGE (EMMA)



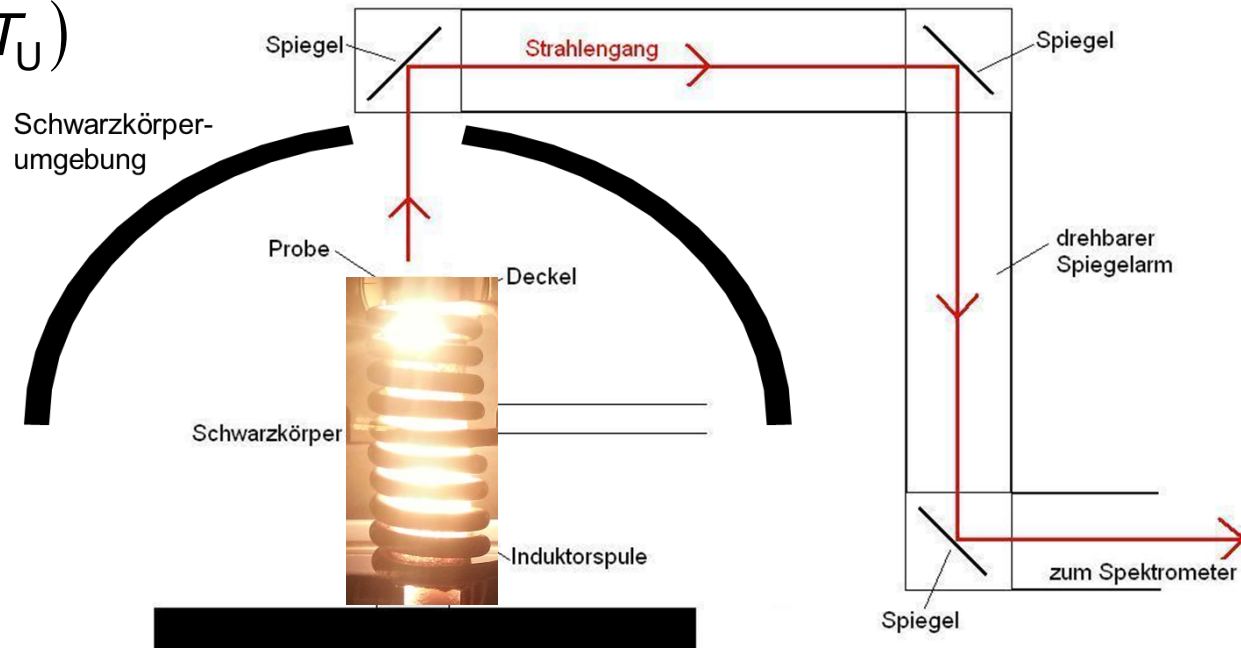
ZAE BAYERN
Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung

Bestimmung des Emissionsgrades aus der gemessenen Intensität

$$i_{\text{Messung}}(T_P) = \varepsilon_g(T_P) \cdot i_S(T_P) + [1 - \varepsilon_g(T_P)] \cdot i_S(T_U)$$

⇒

$$\varepsilon_g(T_P) = \frac{i_{\text{Messung}}(T_P, T_U) - i_S(T_U)}{i_S(T_P) - i_S(T_U)}$$

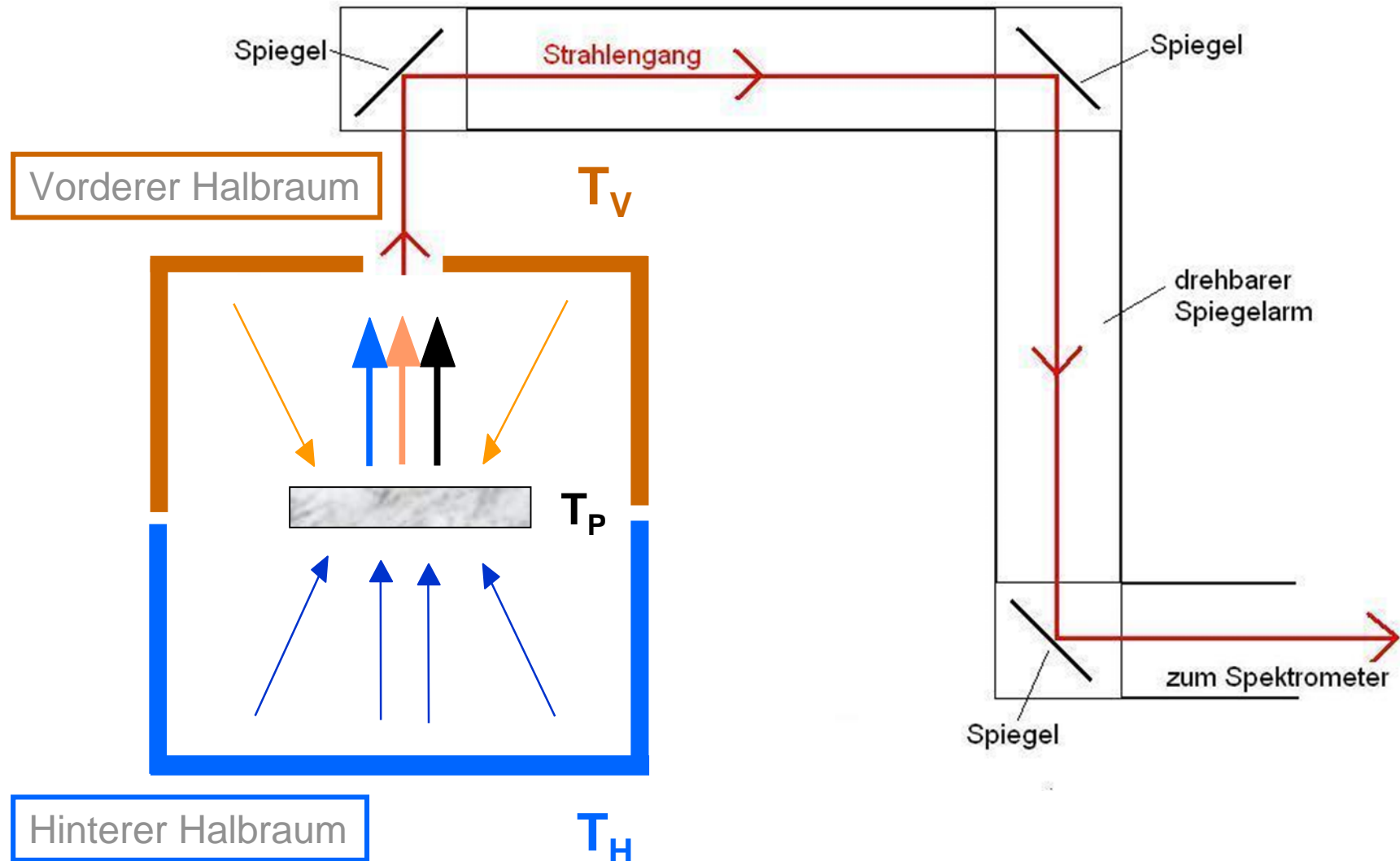


BLACKBODY BOUNDARY CONDITIONS APPARATUR (BBC)



ZAE BAYERN
Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung

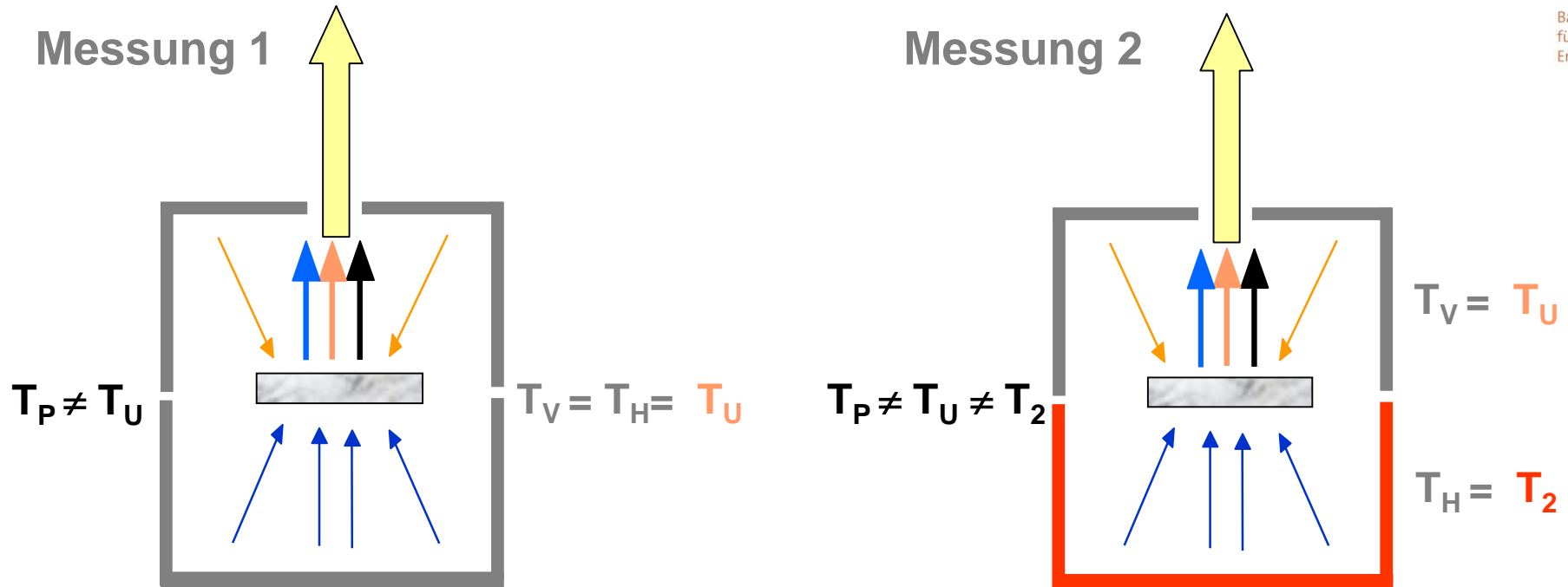
Platzierung der Probe in einer Schwarzkörperumgebung



BLACKBODY BOUNDARY CONDITIONS APPARATUR (BBC)



ZAE BAYERN
Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung



$$(1) \quad i_{\text{Messung 1}}(T_P, T_U) = \underbrace{\varepsilon_g(T_P) \cdot I_S(T_P)}_{\text{Emission}} + \underbrace{\rho_{gh}(T_P) \cdot I_S(T_U)}_{\text{Reflexion}} + \underbrace{\tau_{gh}(T_P) \cdot I_S(T_U)}_{\text{Transmission}}$$

$$(2) \quad i_{\text{Messung 2}}(T_P, T_U, T_2) = \underbrace{\varepsilon_g(T_P) \cdot I_S(T_P)}_{\text{Emission}} + \underbrace{\rho_{gh}(T_P) \cdot I_S(T_U)}_{\text{Reflexion}} + \underbrace{\tau_{gh}(T_P) \cdot I_S(T_2)}_{\text{Transmission}}$$

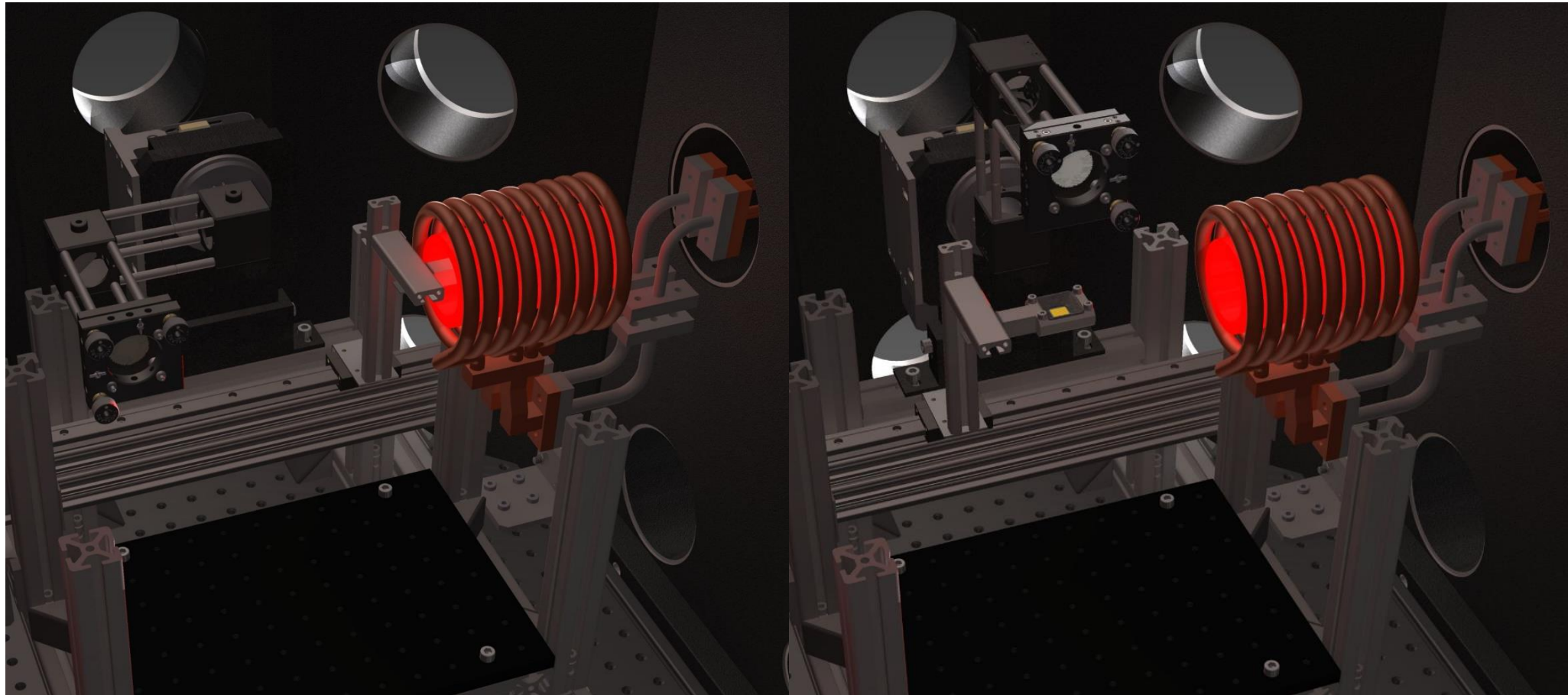
BLACKBODY BOUNDARY CONDITIONS APPARATUR (BBC)



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung

Bestimmung von Emissions- und Transmissionsgrad bei hohen Temperaturen



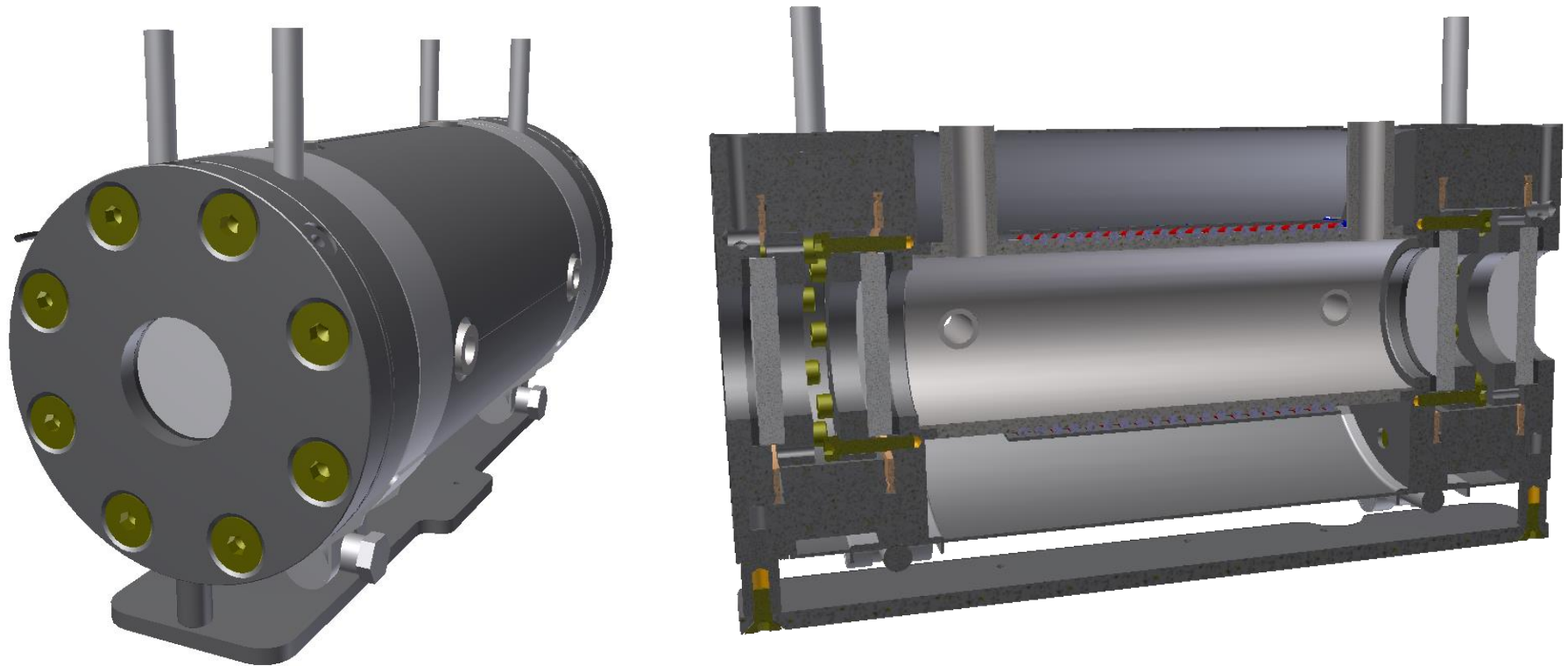
GASMESSZELLE



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung

Hochdruckzelle für Gasmischung bei hohen Drücken und hohen Temperaturen



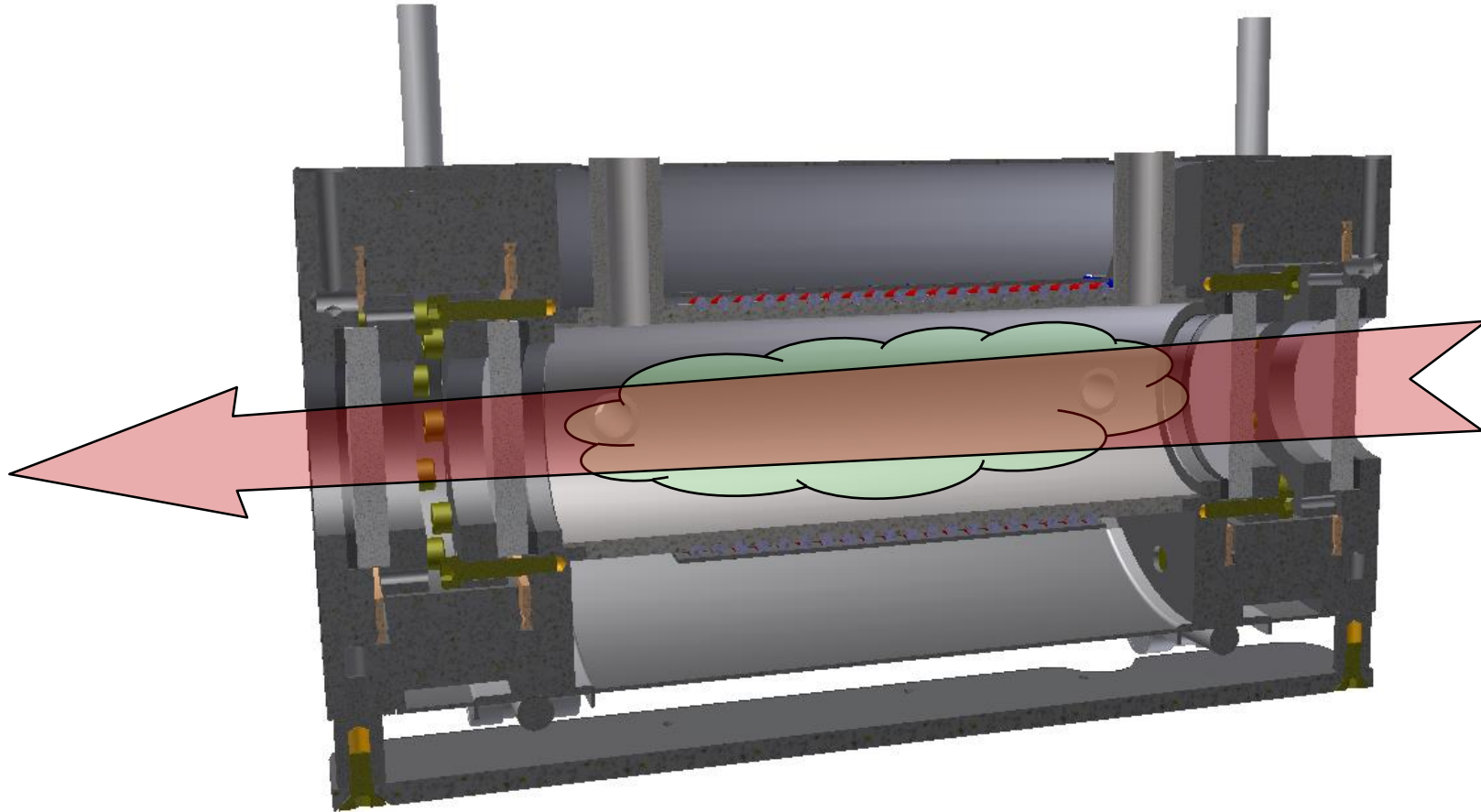
GASMESSZELLE



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung

Hochdruckzelle für Gasmischung bei hohen Drücken und hohen Temperaturen



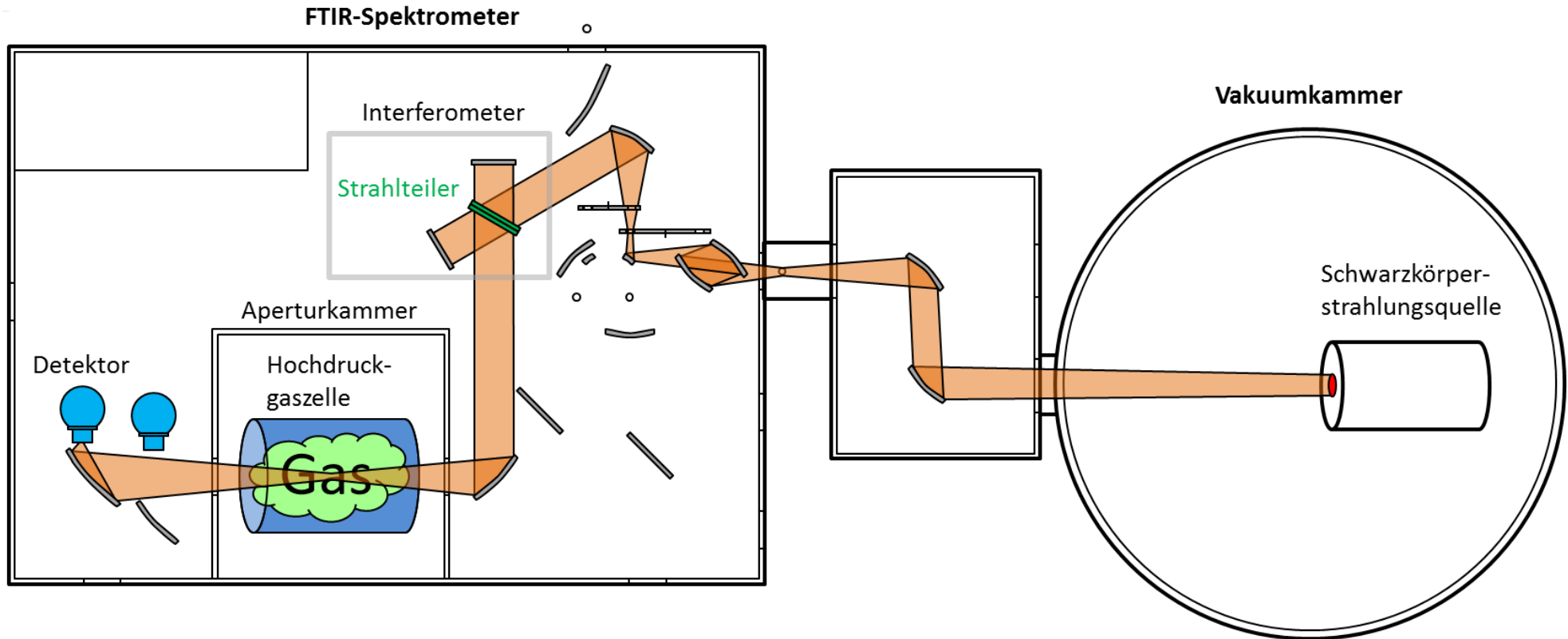
GASMESSZELLE IM SPEKTROMETER



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung

Messzelle im Spektrometer: Bestimmung des Transmissionsgrades



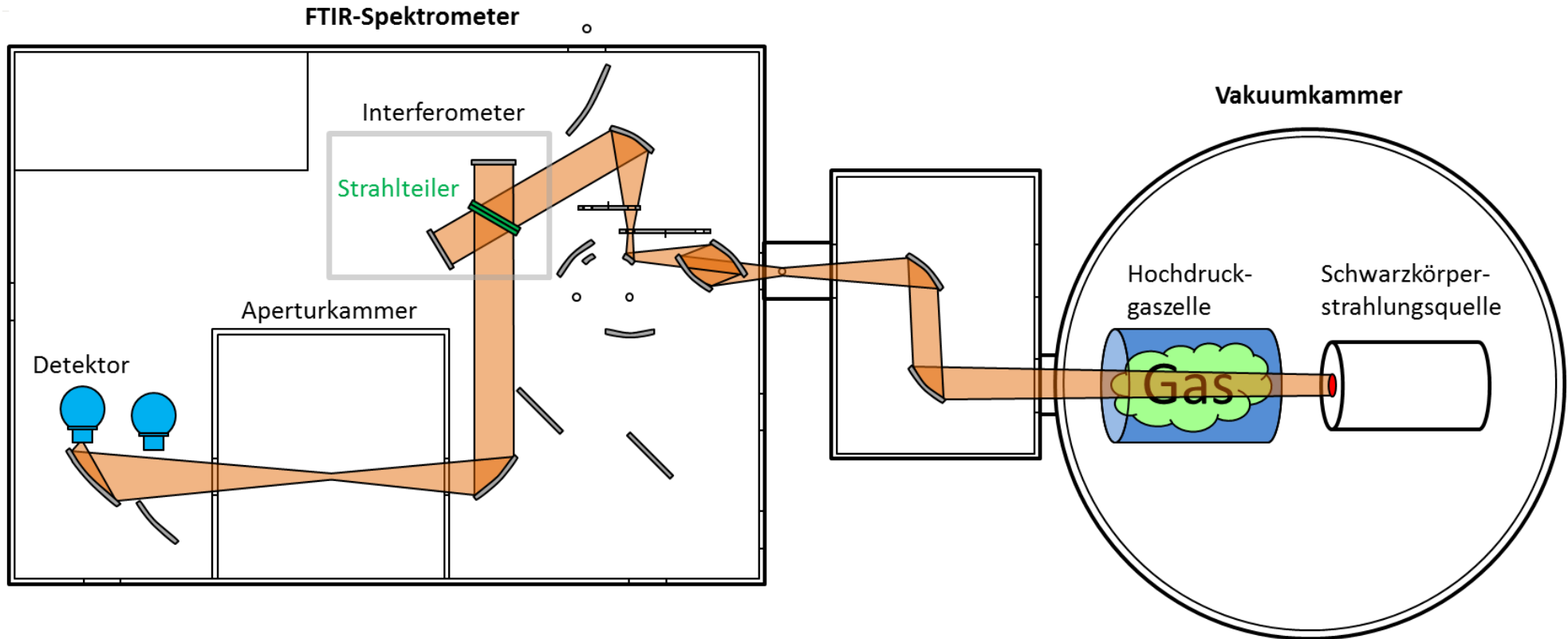
GASMESSZELLE IM SPEKTROMETER



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung

Messzelle vor der heißen Oberfläche: Einfluss des Heißgases



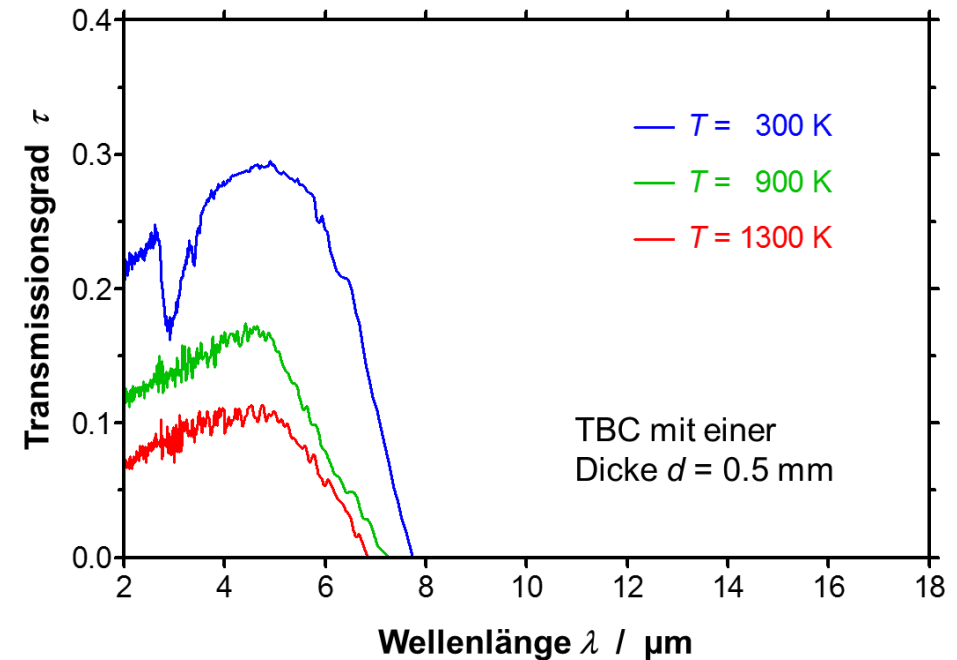
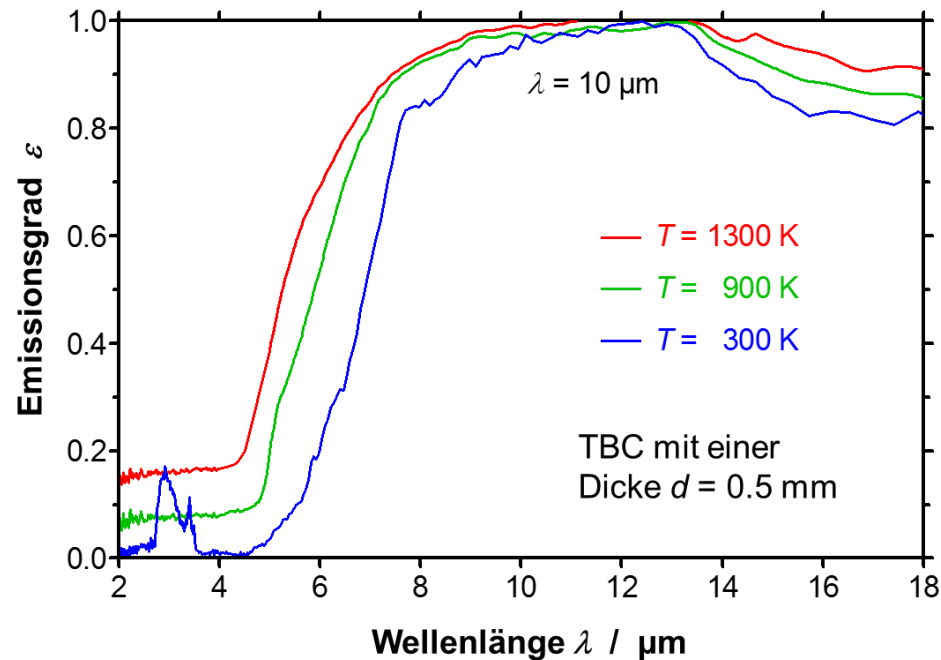
CHARAKTERISIERUNG VON TBCS MIT BBC



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung

keramische Wärmedämmschicht:
mit Yttriumoxid teilstabilisiertes Zirkonoxid

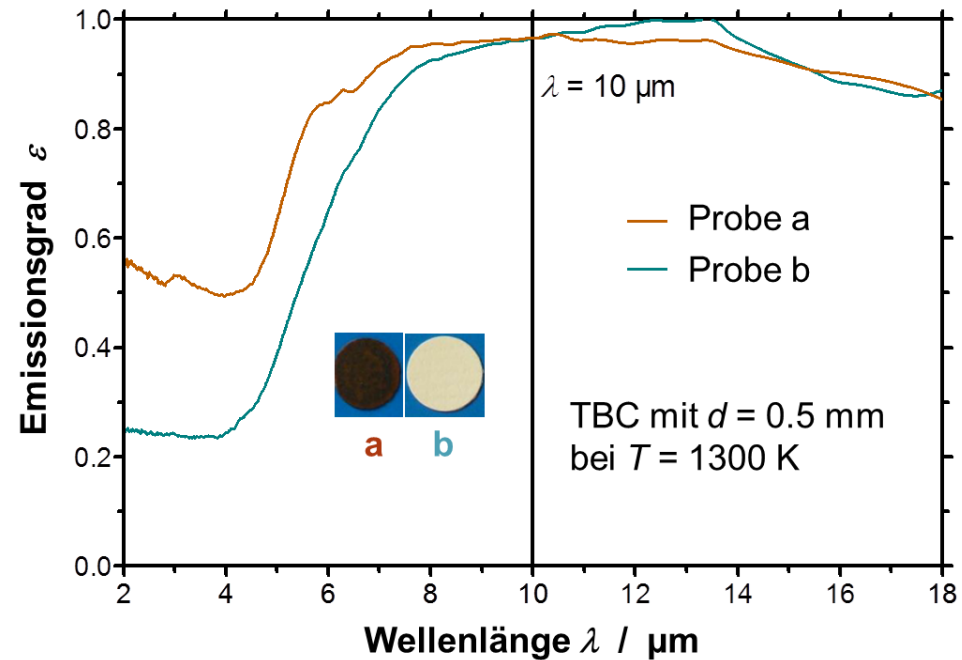
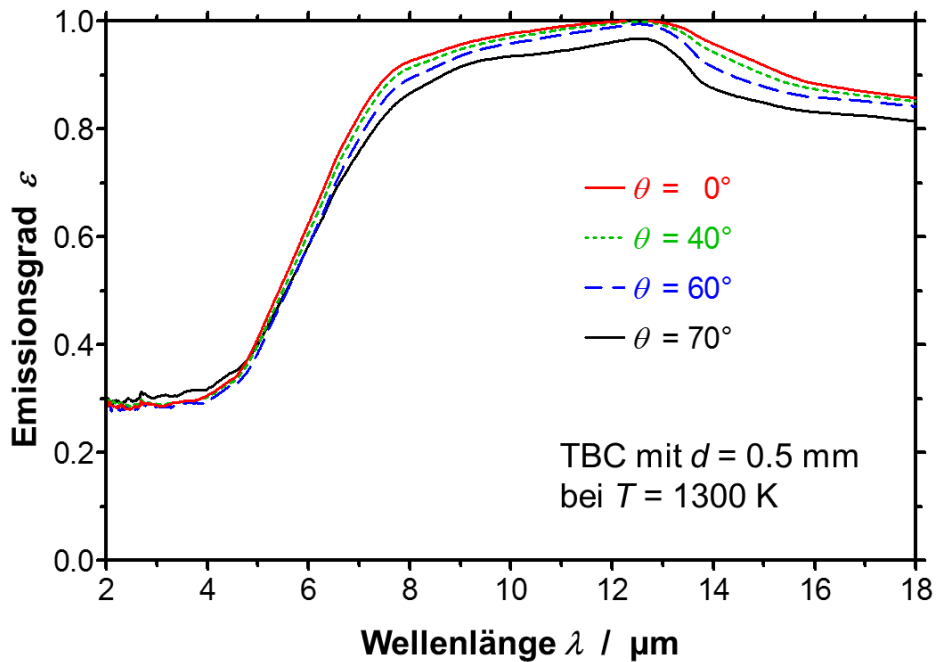


CHARAKTERISIERUNG VON TBCS MIT EMMA



ZAE BAYERN
Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung

keramische Wärmedämmschicht:
mit Yttriumoxid teilstabilisiertes Zirkonoxid



CHARAKTERISIERUNG VON GASEN MIT HOCHDRUCKZELLE

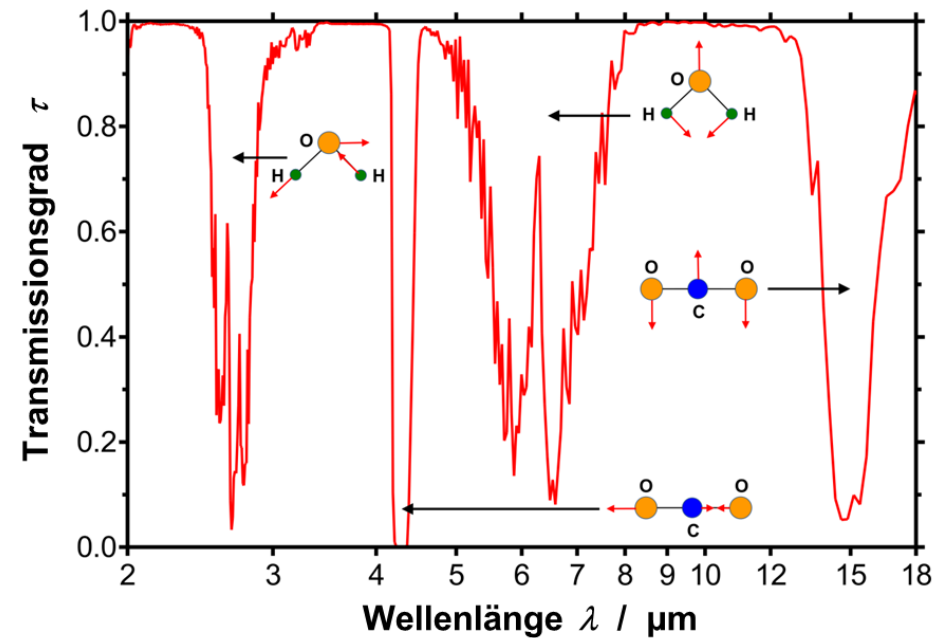


ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung

typische Gaszusammensetzung bei 1600 K und 13 bar

Gas	Anteil
N ₂	75 %
O ₂	10 %
H ₂ O	10 %
CO ₂	5 %



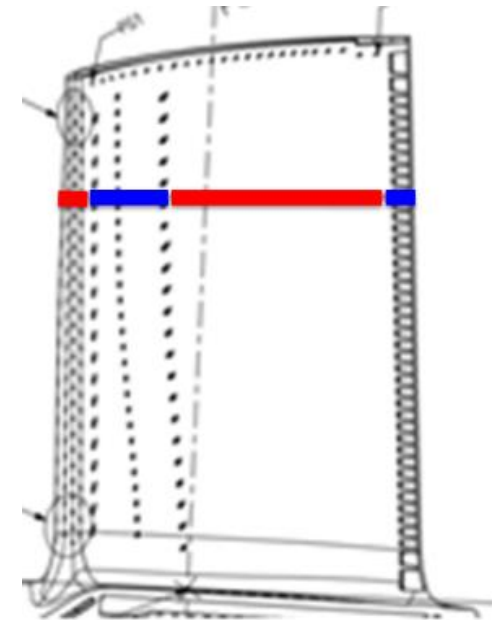
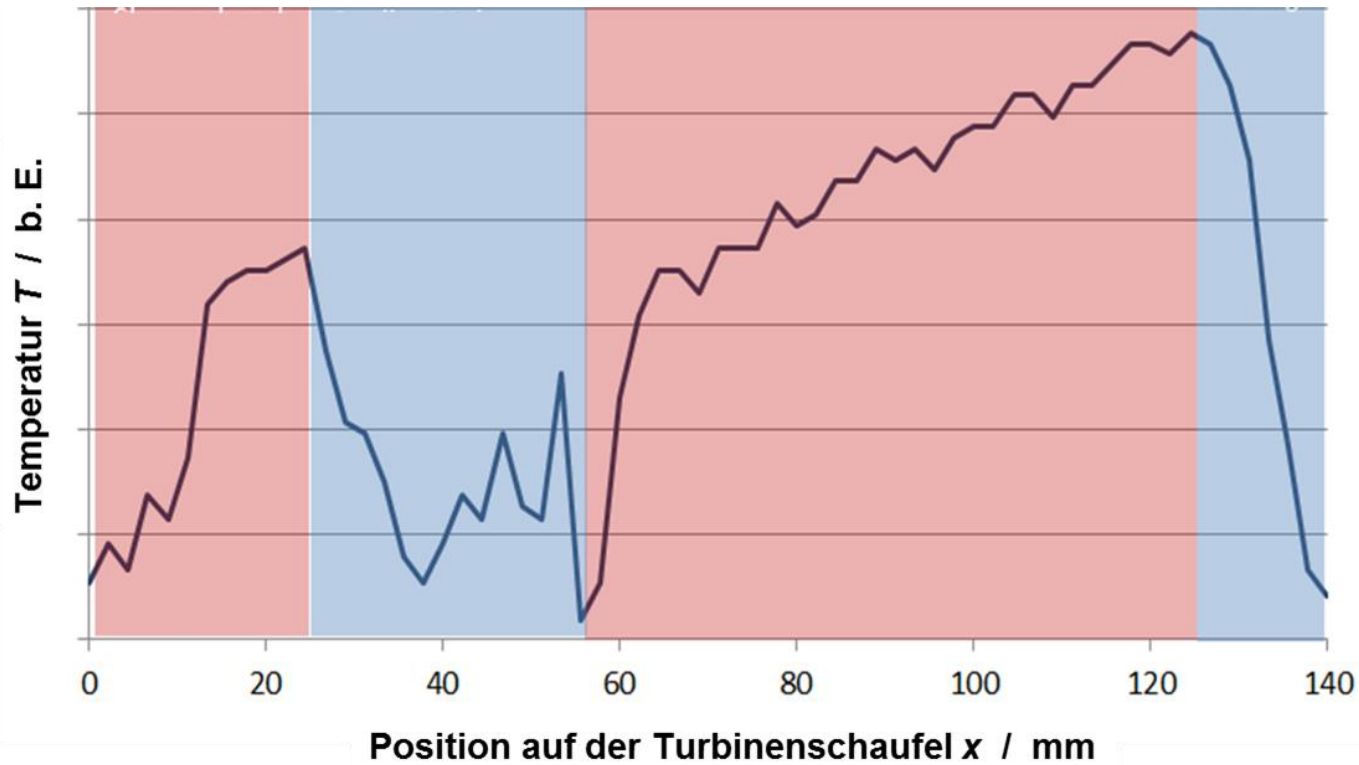
TEMPERATURMESSUNG IN GASTURBINEN



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung

berührungslose Bestimmung der Temperaturen in Gasturbinen



TEMPERATURMESSUNG IN GASTURBINEN



ZAE BAYERN
Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung

Unsicherheitsanalyse

Einflussgröße	Sensitivität	Unsicherheit	Standard- unsicherheit
Transmissionsgrad Gas	8 °C / %	1 %	8 °C
Emissionsgrad TBC	8 °C / %	1 %	8 °C
Abstand Messfleck	1 °C / %	5 %	5 °C
Korrelation zwischen Emissionsgrad und Reflexionsgrad TBC			
Wärmeabstrahlung Optik	8 °C / %	0.5 %	4 °C
Verschmutzung Optik	8 °C / %	0.5 %	4 °C
Stabilität Detektor	8 °C / %	0.5 %	4 °C
örtliche Auflösung	15 °C / mm	0.25 mm	3.8 °C
Rauschen			
...			
gesamte Standardunsicherheit		$k = 1$	14.2 °C
erweiterte gesamte Standardunsicherheit		$k = 2$	28.4 °C

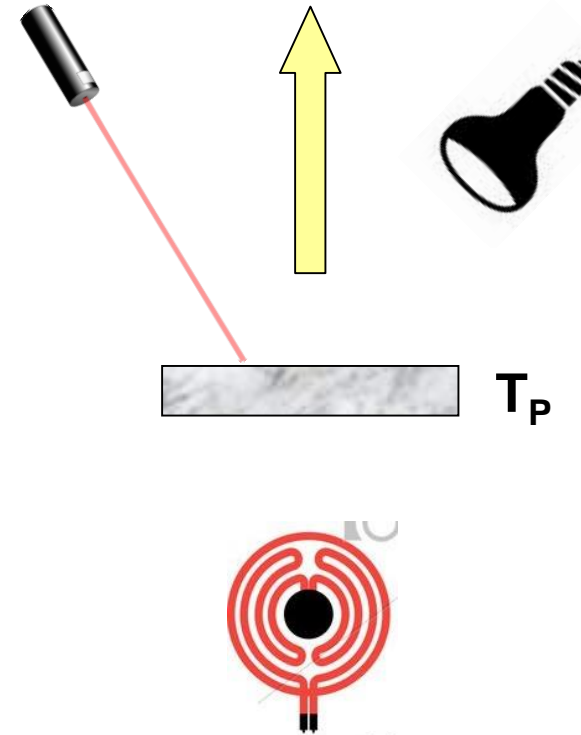
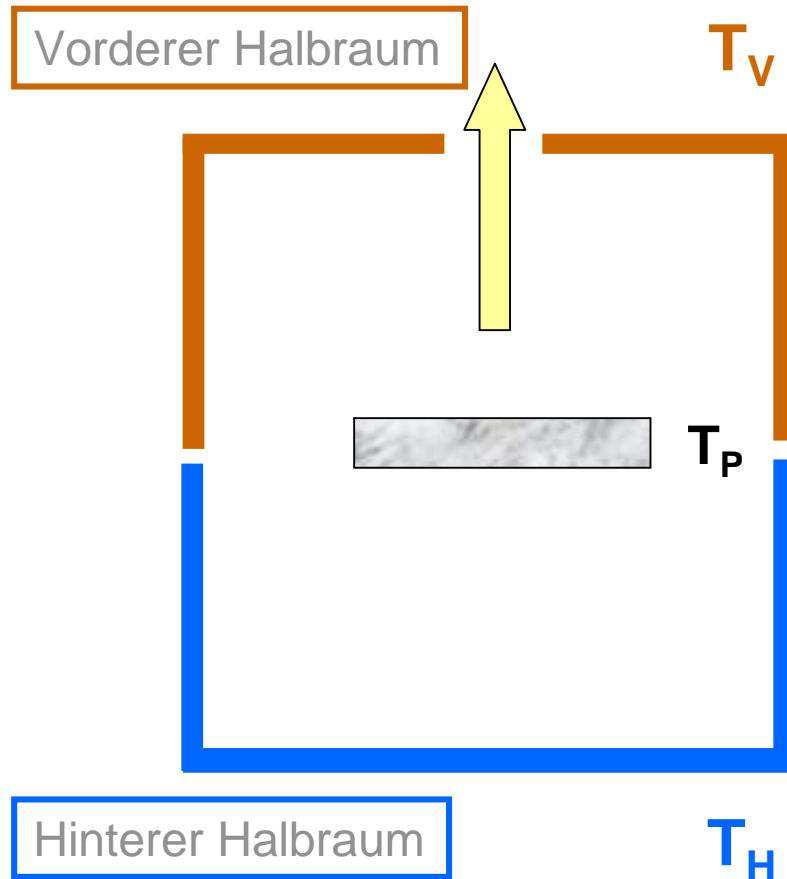
BERÜHRUNGSLÖSE ERFASSUNG VON DELAMINATIONEN



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung

Messung von Wärmeabstrahlung bzw. Temperatur nach Wärmeeinkopplung



ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

- **Messmethoden für hohe Temperaturen und Drücke**
 - Verfahren für Hochtemperaturmessungen mittels Induktionsheizung
 - infrarot-optische Charakterisierung von Gasen unter Extrembedingungen
- **Charakterisierungen von Schichtsystemen und Gasen**
 - Emissionsgrad und Transmissionsgrad keramischer Wärmedämmschichten
 - Absorptionsgrad und Transmissionsgrad von Verbrennungsgasen
- **Zusammenfassung und Ausblick**
 - EU-Projekt STARGATE → berührungslose Temperaturmessung an TBCs
 - BMWi-Projekt OptTBCs → zerstörungsfreie Charakterisierung von TBCs



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Vielen Dank!

MIT SONNE UND VERSTAND.

© ZAE Bayern

jochen.manara@zae-bayern.de



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung