

Spektral-selektive Beschichtungen zur Verbesserung der Effizienz von Flugzeugtriebwerken

J. Manara, T. Stark, M. Arduini, H.-P. Ebert, A. Shandy, M. Zipf, J. Hartmann, F. Kuchar, O. Paris, R. Meisels, C. Mitterer, J. O. Peters, T. Gartner, U. Schulz



Lufthansa Technik

Erhöhung des Wirkungsgrades von Flugzeugtriebwerken

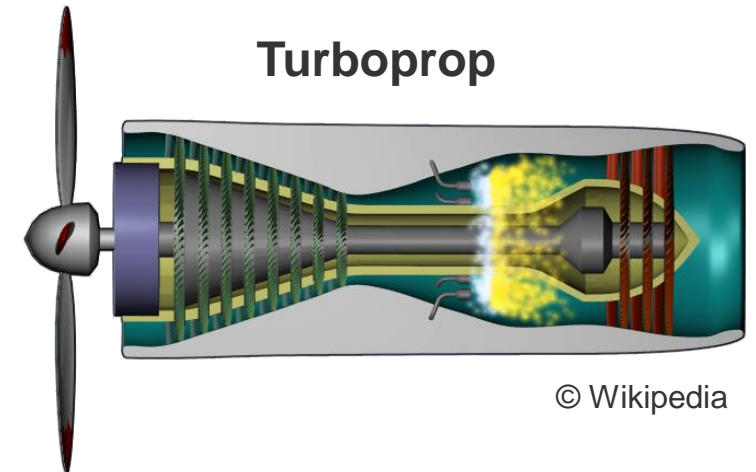
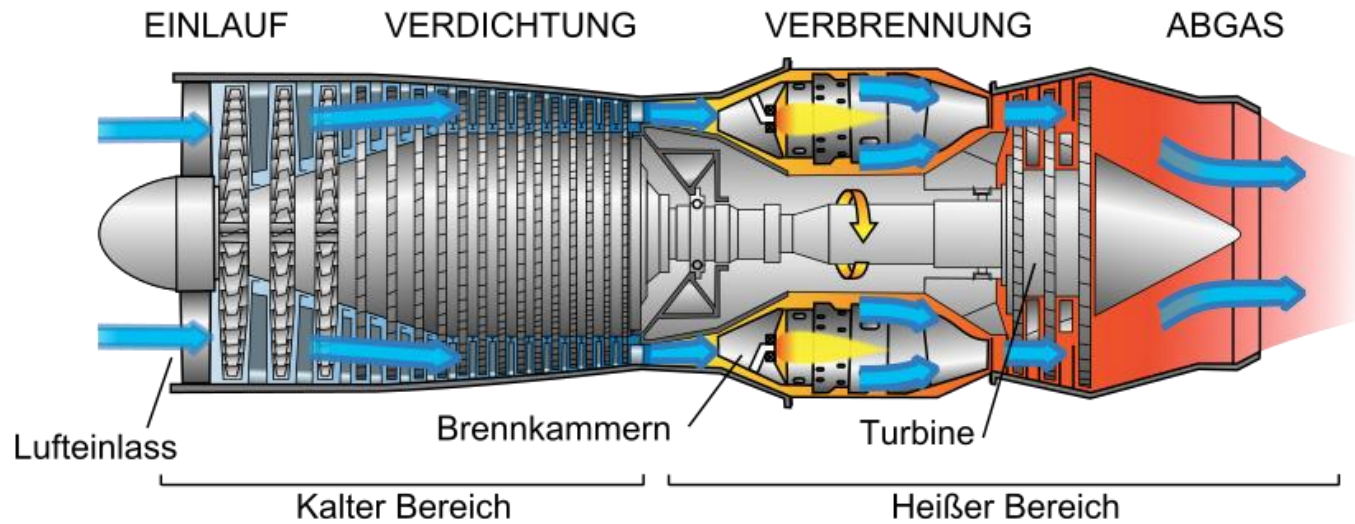
- Entwicklung und Simulation spektral-selektiver und wärmereflektierender Beschichtungen

Charakterisierung der Schichtmaterialien bei hohen Temperaturen

- Bestimmung der komplexen Brechungsindizes
- Bestimmung des spektralen Emissions-, Reflexions- und Transmissionsgrades

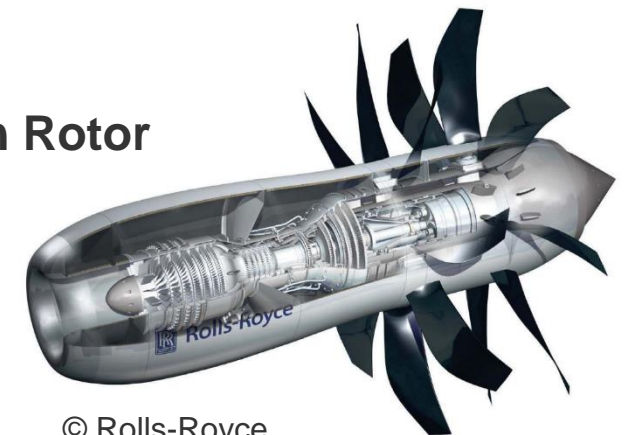
Zukünftige Entwicklungen und Perspektiven

Strahltriebwerk

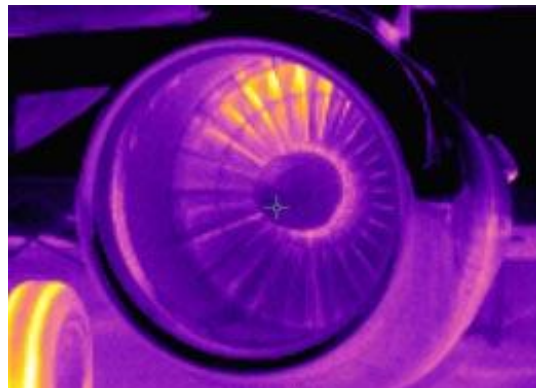


© Wikipedia

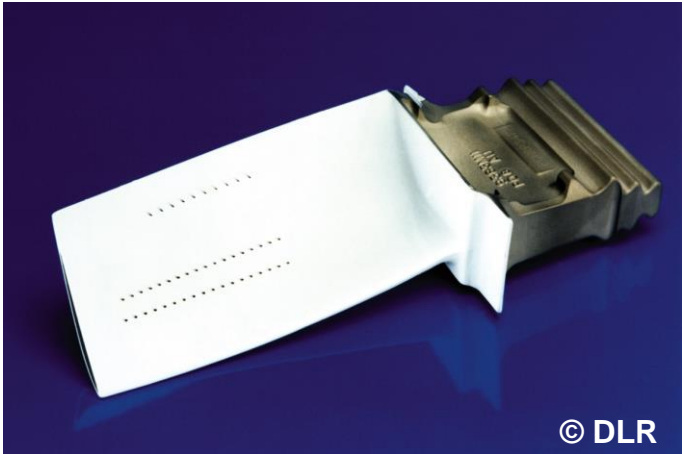
Open Rotor



© Rolls-Royce

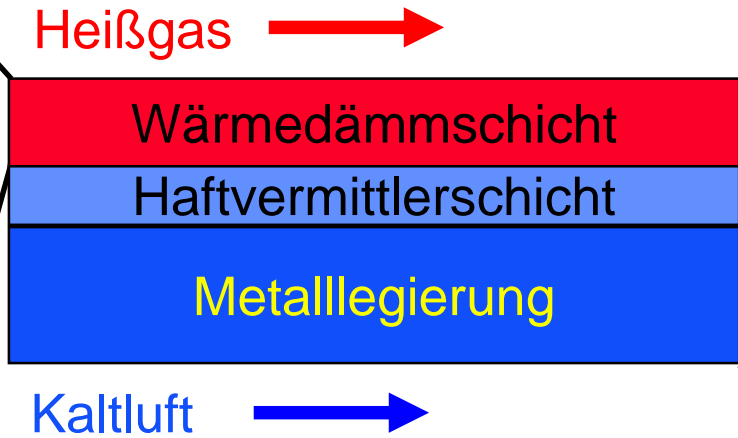
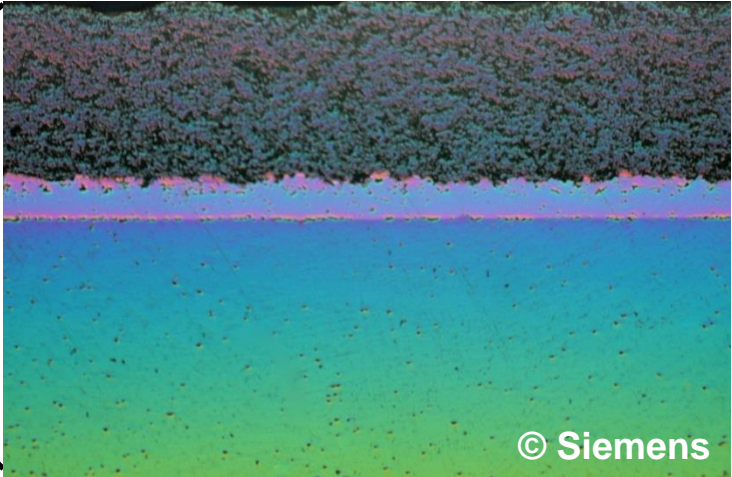
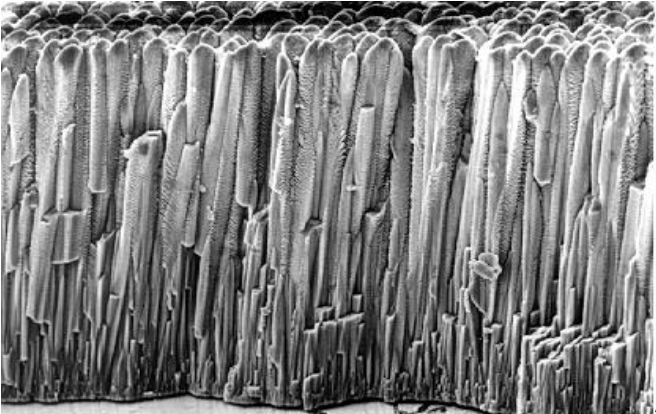


Keramische Wärmedämmschichten (Thermal Barrier Coatings, TBCs)

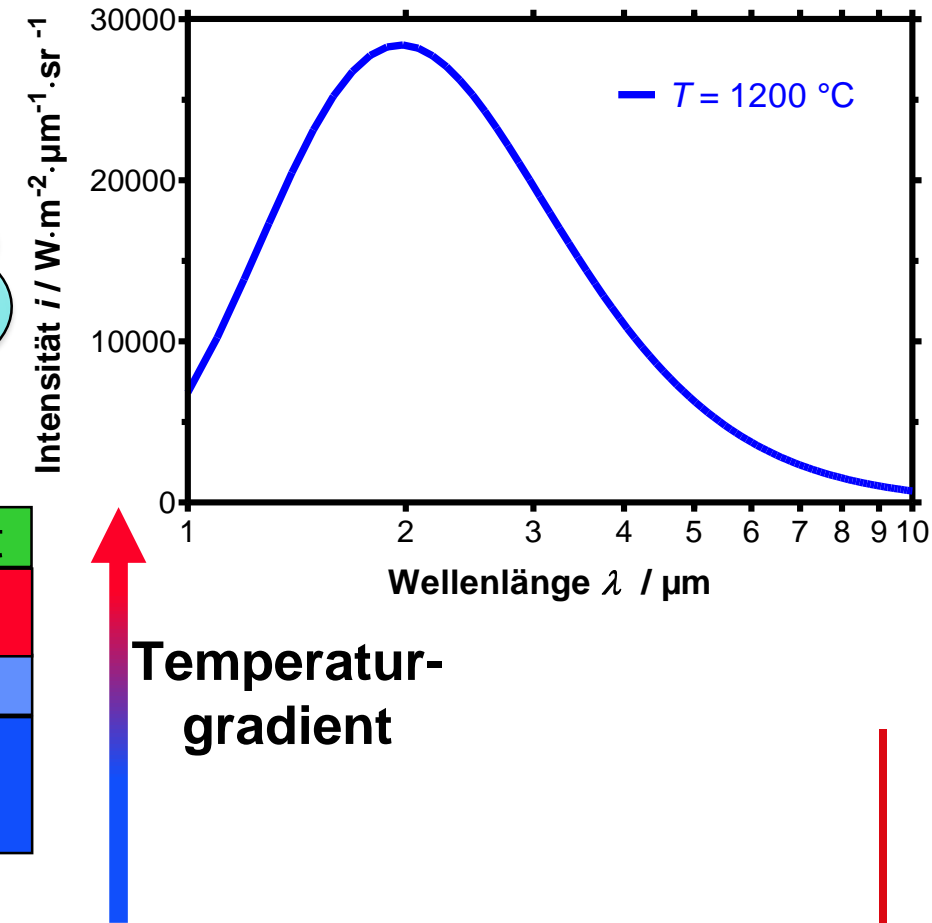
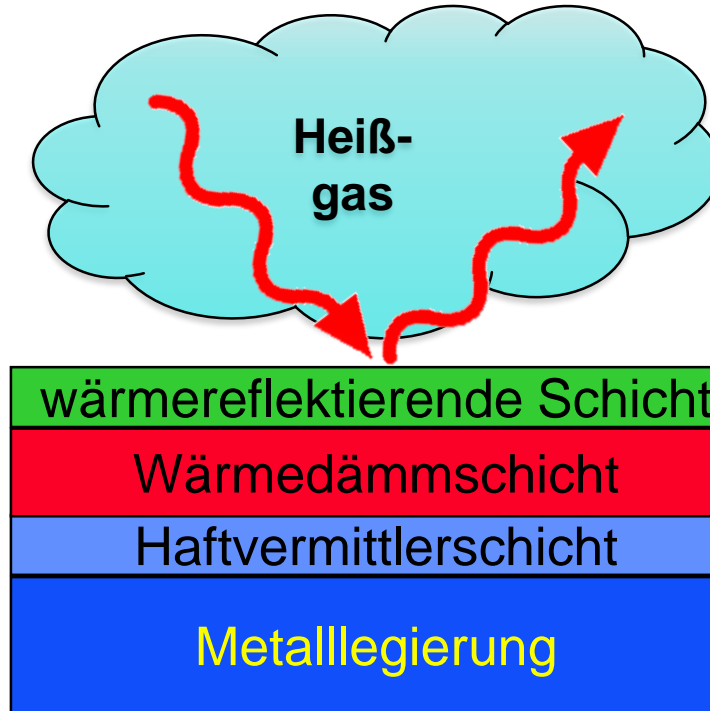
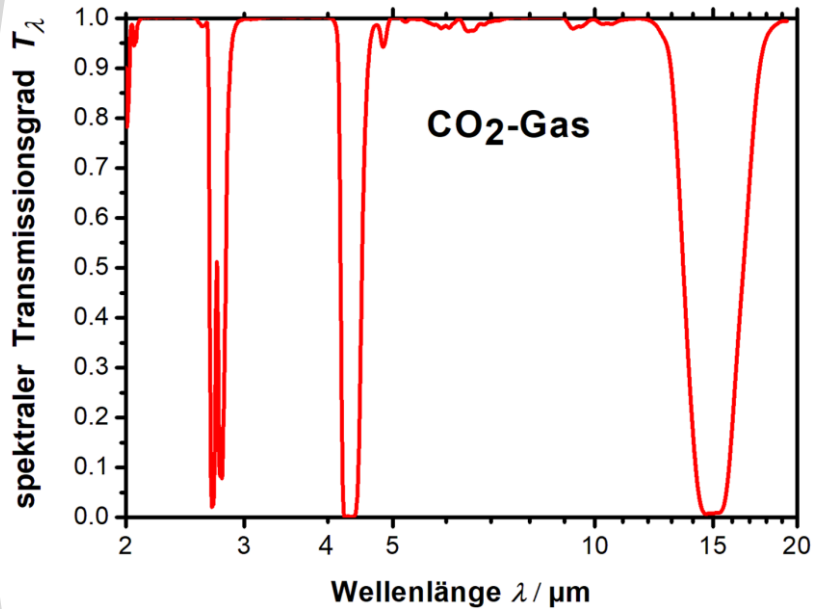


EB-PVD-Schichten

APS-Schichten



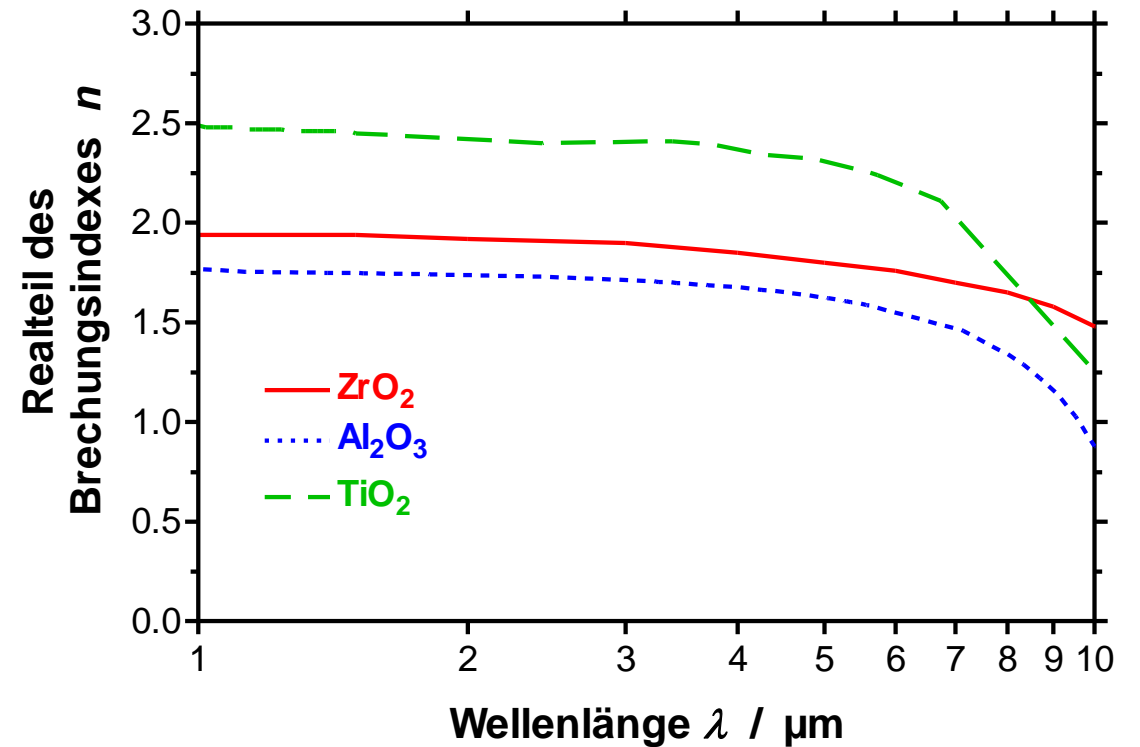
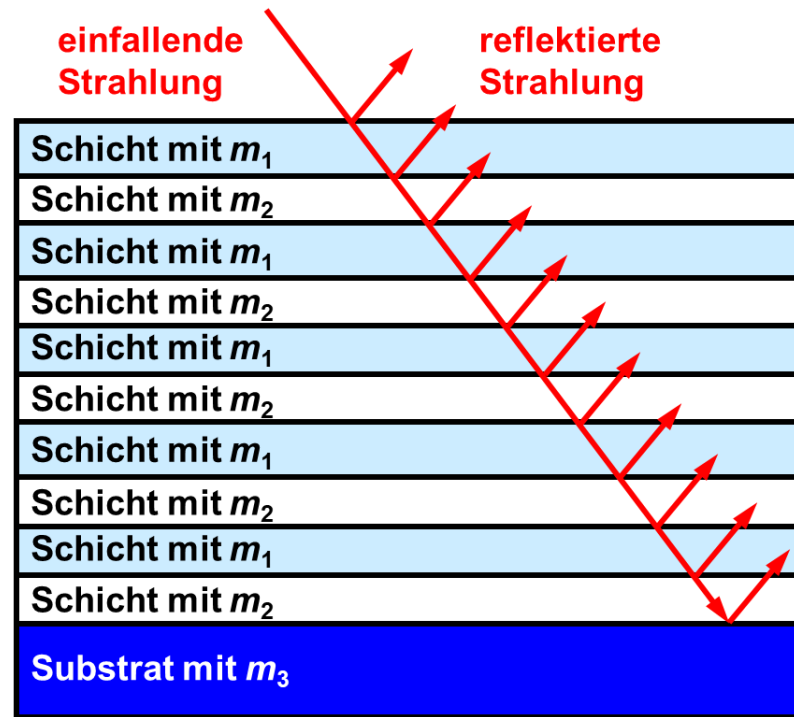
Spektral selektive Beschichtungen: Reflektion der Wärmestrahlung des Heißgases



Spektral selektive Beschichtungen: Multilagenschicht aus alternierenden Einzelschichten

$$m(T) = n(T) + i \cdot k(T)$$

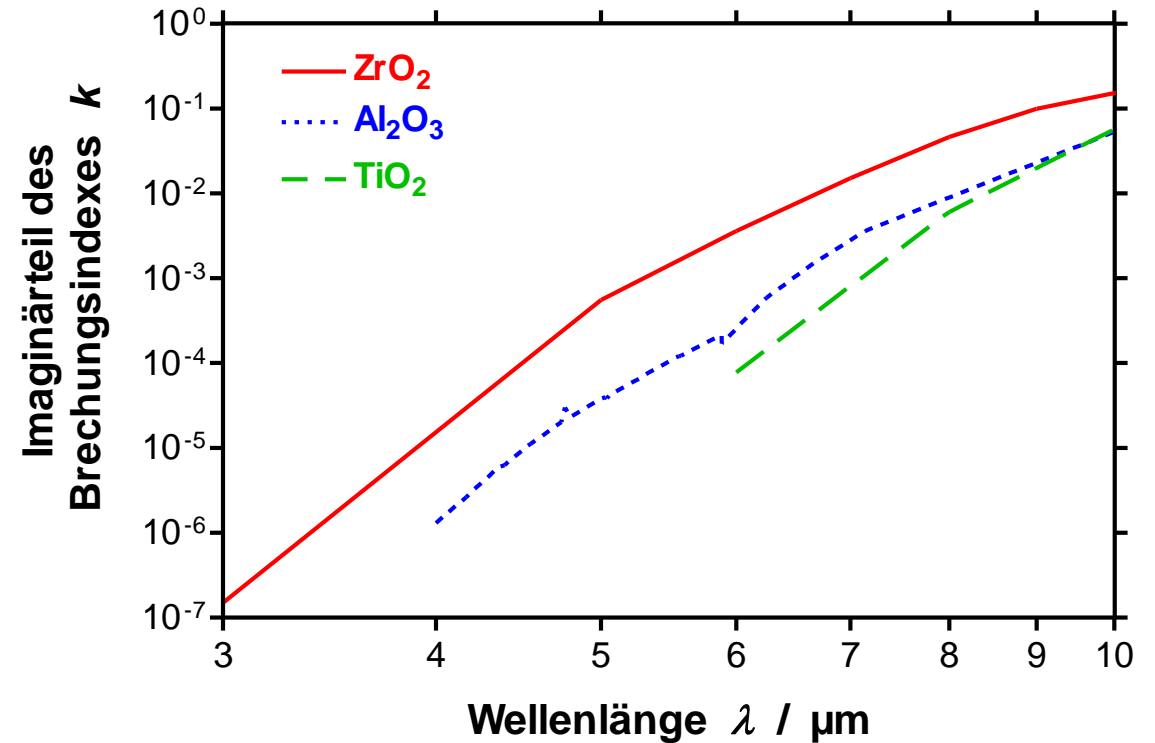
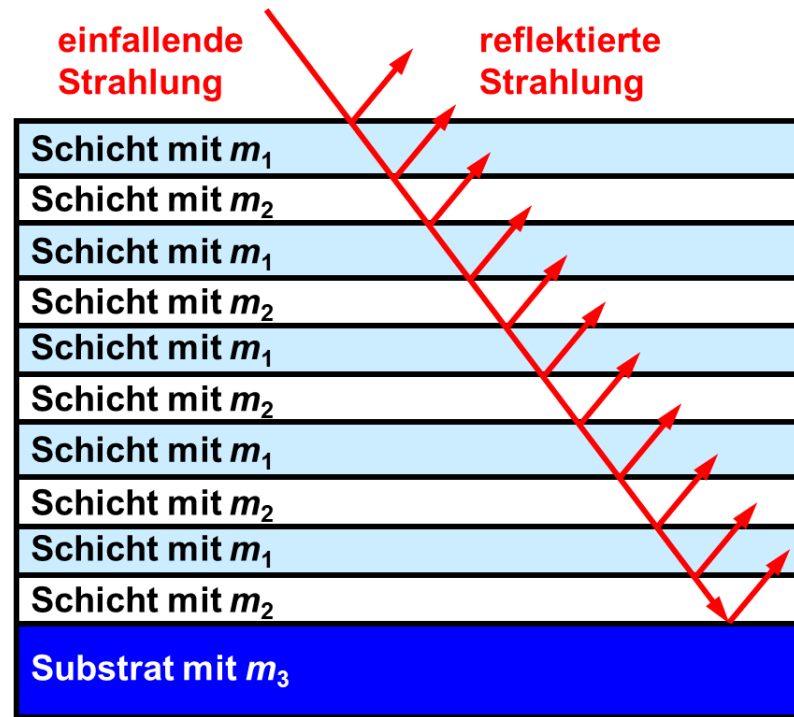
$$\rho(T) = \frac{[n_2(T) - n_1(T)]^2 + [k_2(T) - k_1(T)]^2}{[n_2(T) + n_1(T)]^2 + [k_2(T) + k_1(T)]^2}$$



Spektral selektive Beschichtungen: Multilagenschicht aus alternierenden Einzelschichten

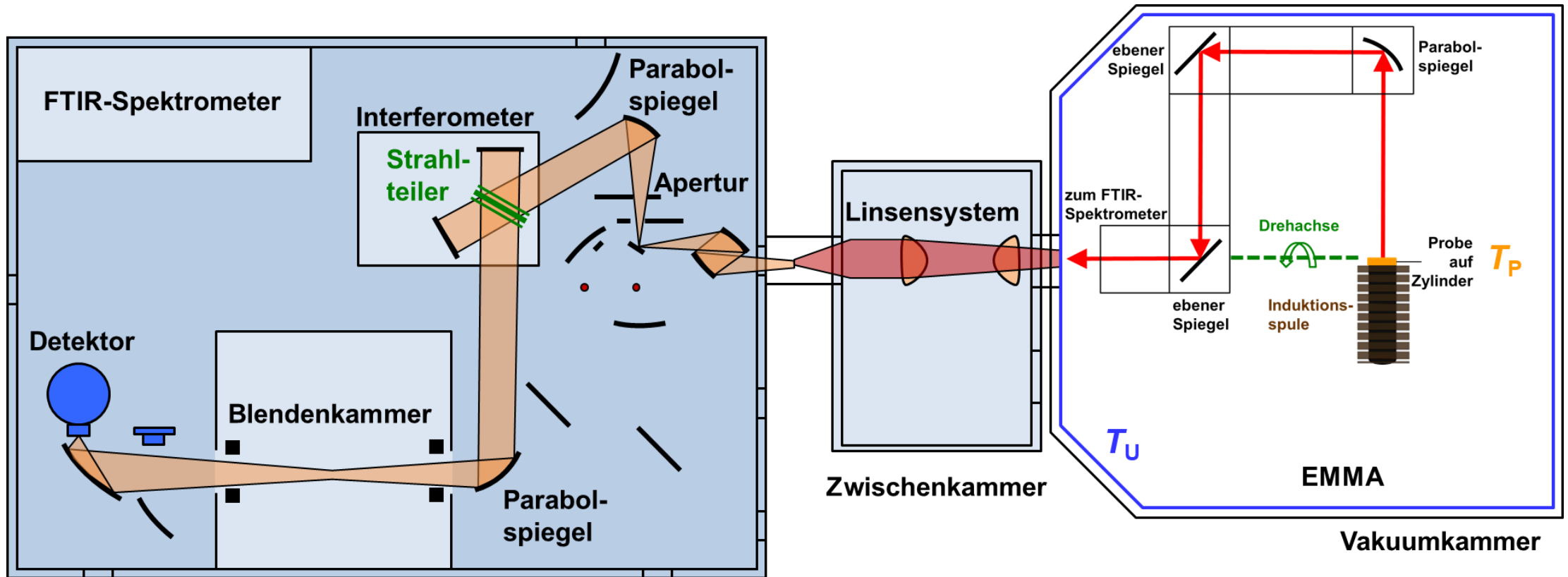
$$m(T) = n(T) + i \cdot k(T)$$

$$\rho(T) = \frac{[n_2(T) - n_1(T)]^2 + [k_2(T) - k_1(T)]^2}{[n_2(T) + n_1(T)]^2 + [k_2(T) + k_1(T)]^2}$$



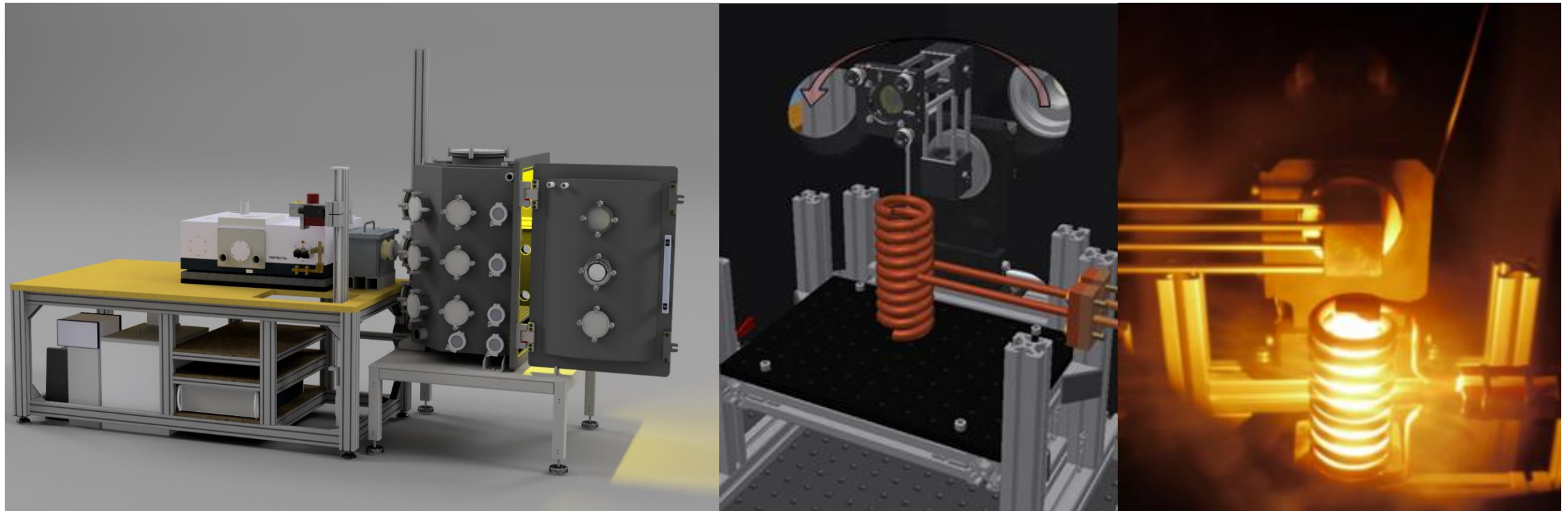
Emissionsgrad-Messanlage (EMMA) zur Charakterisierung opaker Proben

EMMA mit Zwischenkammer und FTIR-Spektrometer

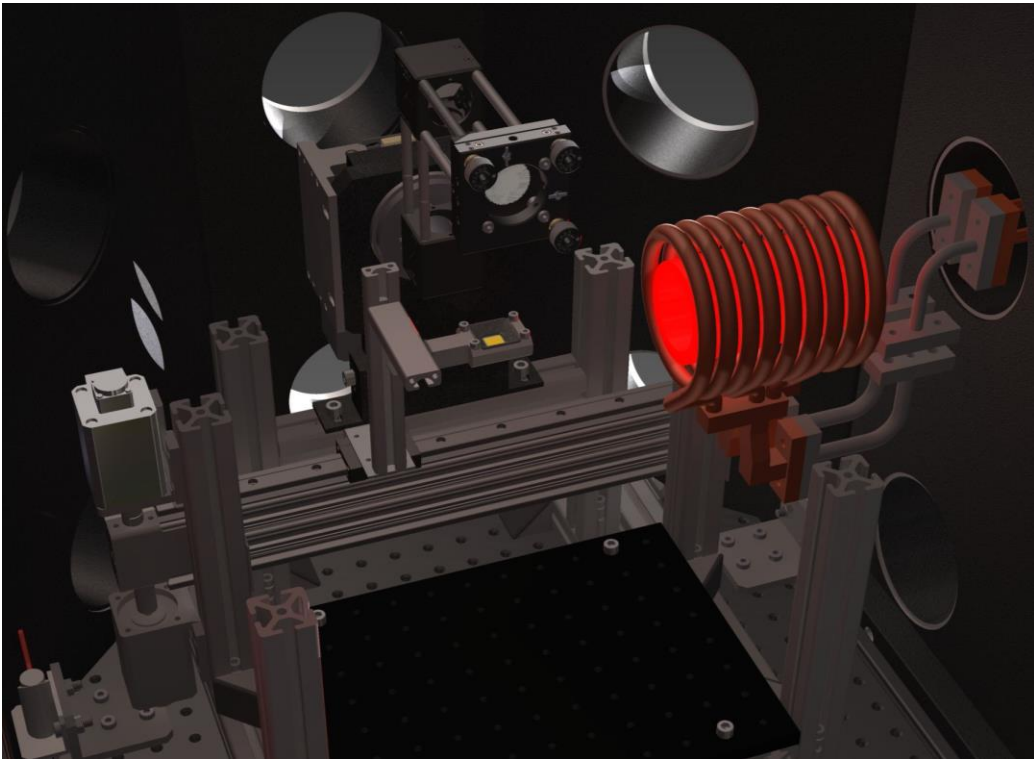
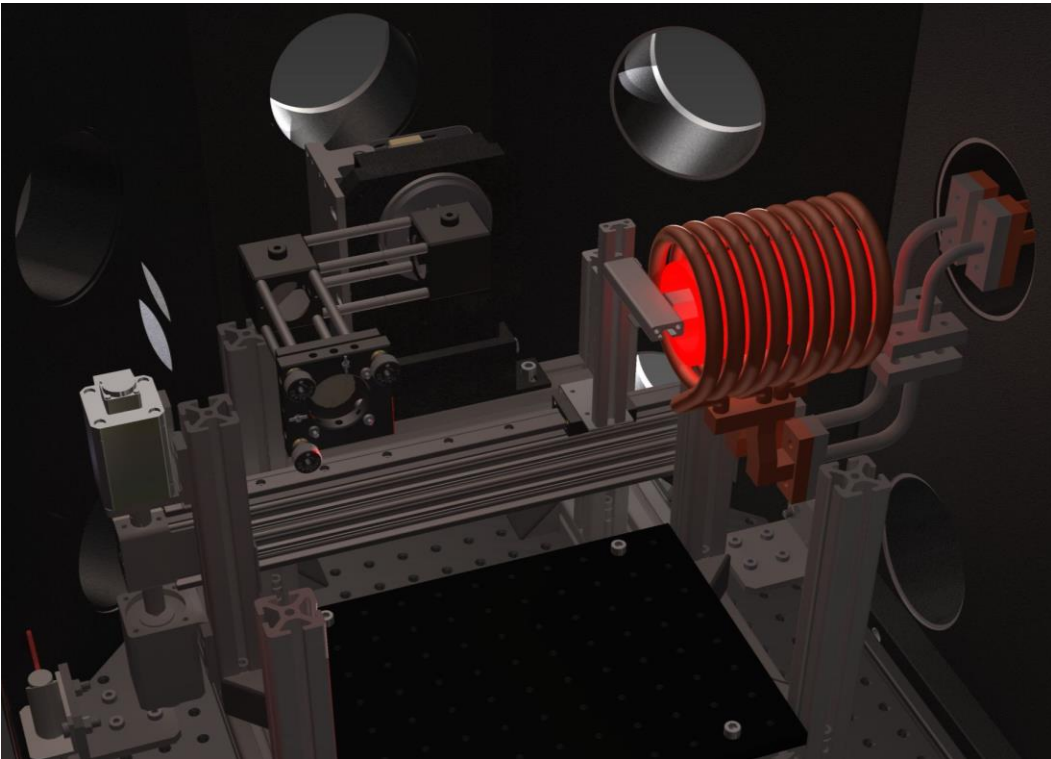


Emissionsgrad-Messanlage (EMMA) zur Charakterisierung opaker Proben

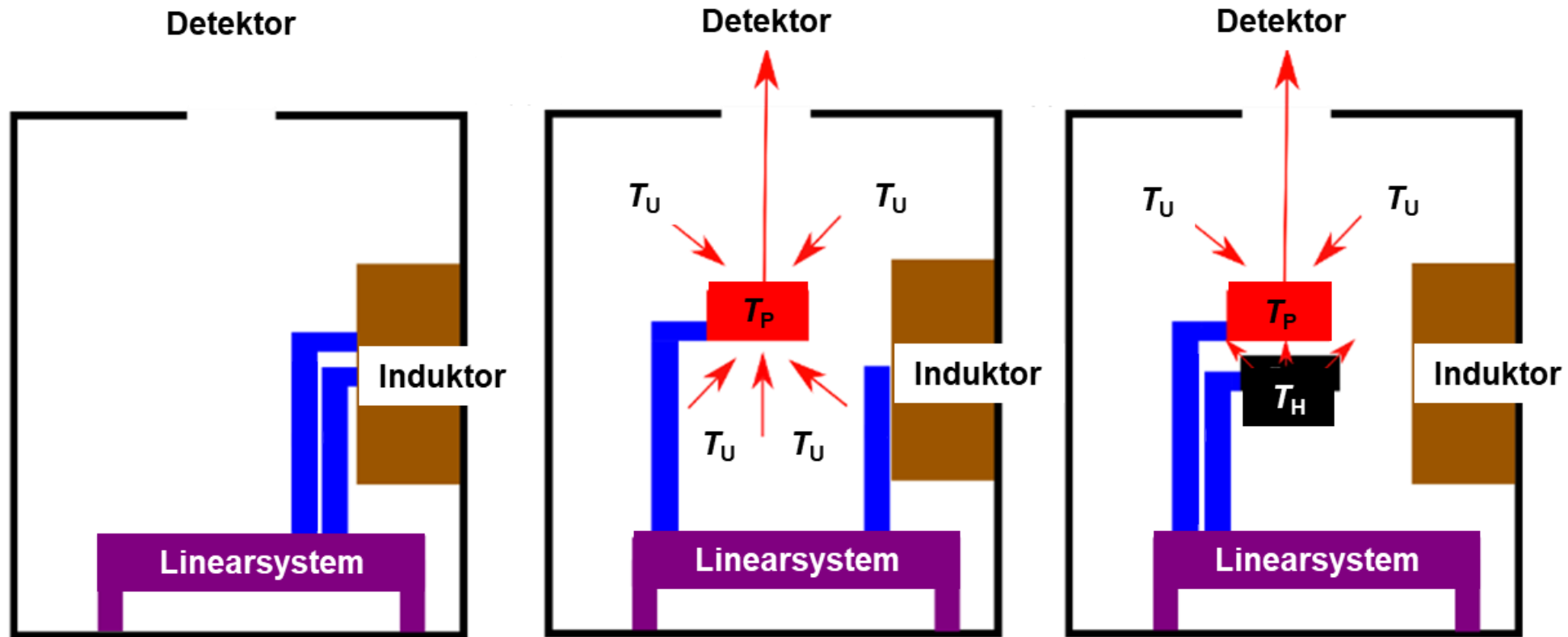
EMMA mit Zwischenkammer und FTIR-Spektrometer



Black Body Boundary Conditions (BBC) Anlage zur Charakterisierung semi-transparenter Proben



Black Body Boundary Conditions (BBC) Anlage zur Charakterisierung semi-transparenter Proben



$$i_{\text{mess}}(\lambda, T_P, T_U) = \varepsilon_{\lambda}(T_P) \cdot i_{\text{bb}}(\lambda, T_P) + R_{\text{gh}}(T_P) \cdot I_{\text{bb}}(\lambda, T_U) + T_{\text{gh}}(T_P) \cdot I_{\text{bb}}(\lambda, T_U)$$

Bestimmung der komplexen Brechungsindizes aus spektralen Messungen von Emissions- und Transmissionsgrad

$$m_1(T) = n_1(T) + i \cdot k_1(T) \quad , \quad m_2(T) = n_2(T) + i \cdot k_2(T)$$

$$\rho(T) = \frac{[n_2(T) - n_1(T)]^2 + [k_2(T) - k_1(T)]^2}{[n_2(T) + n_1(T)]^2 + [k_2(T) + k_1(T)]^2} \quad , \quad \tau(T) = \exp \left[-\frac{4 \cdot \pi \cdot k_2(T)}{\lambda} \cdot d \right]$$

$$T_{gg}(T) = \tau(T) \cdot \frac{[1 - \rho(T)]^2}{1 - \rho^2(T) \cdot \tau^2(T)} \quad , \quad R_{gg}(T) = \rho(T) \cdot \left[1 + \frac{[1 - \rho(T)]^2 \cdot \tau^2(T)}{1 - \rho^2(T) \cdot \tau^2(T)} \right]$$

Umgebung mit m_1

TiO₂-Schicht mit m_2

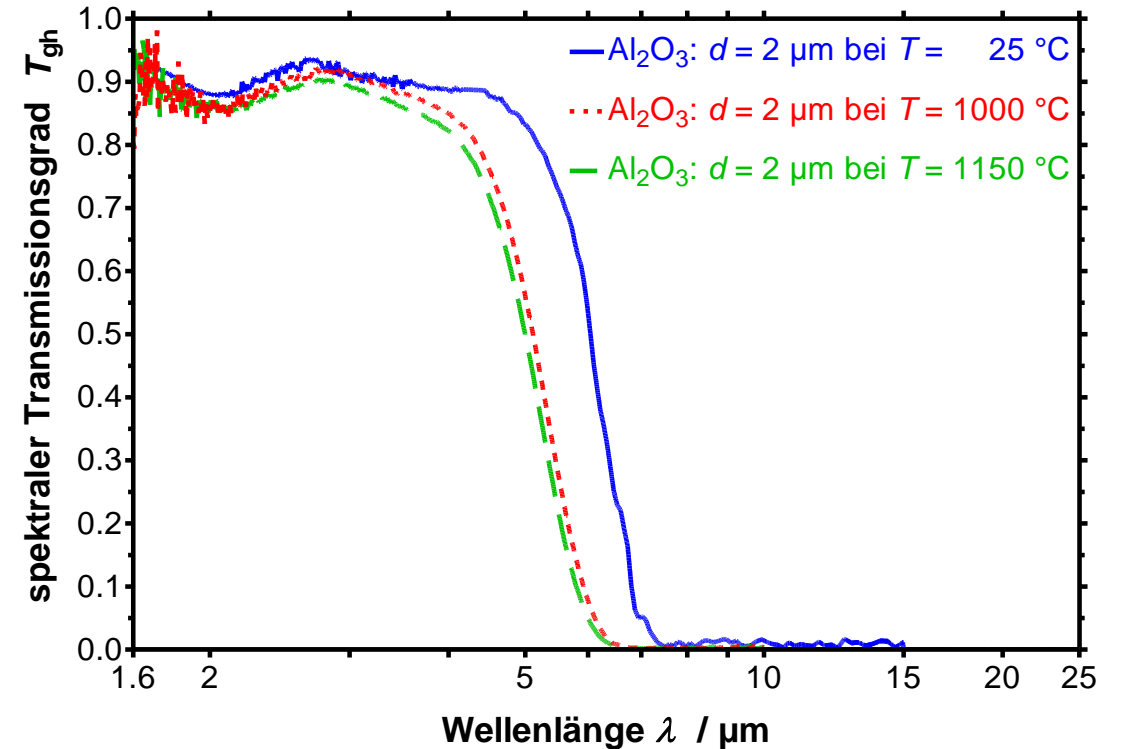
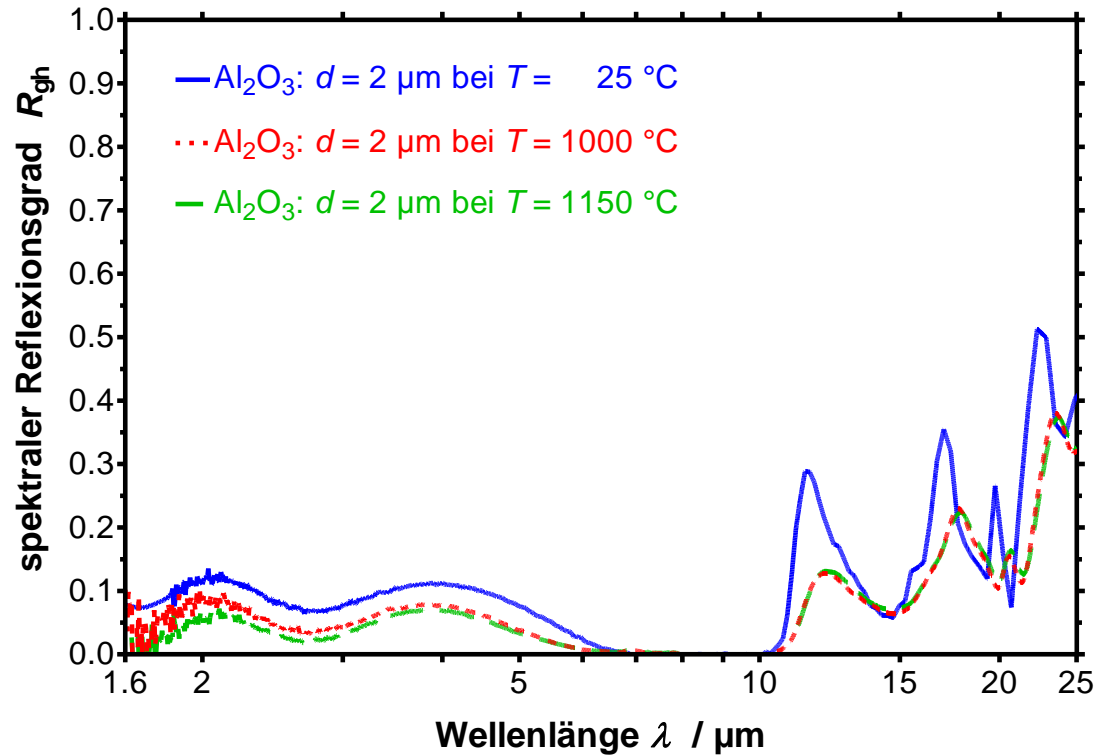
Saphir-Substrat mit m_3

Umgebung mit m_1

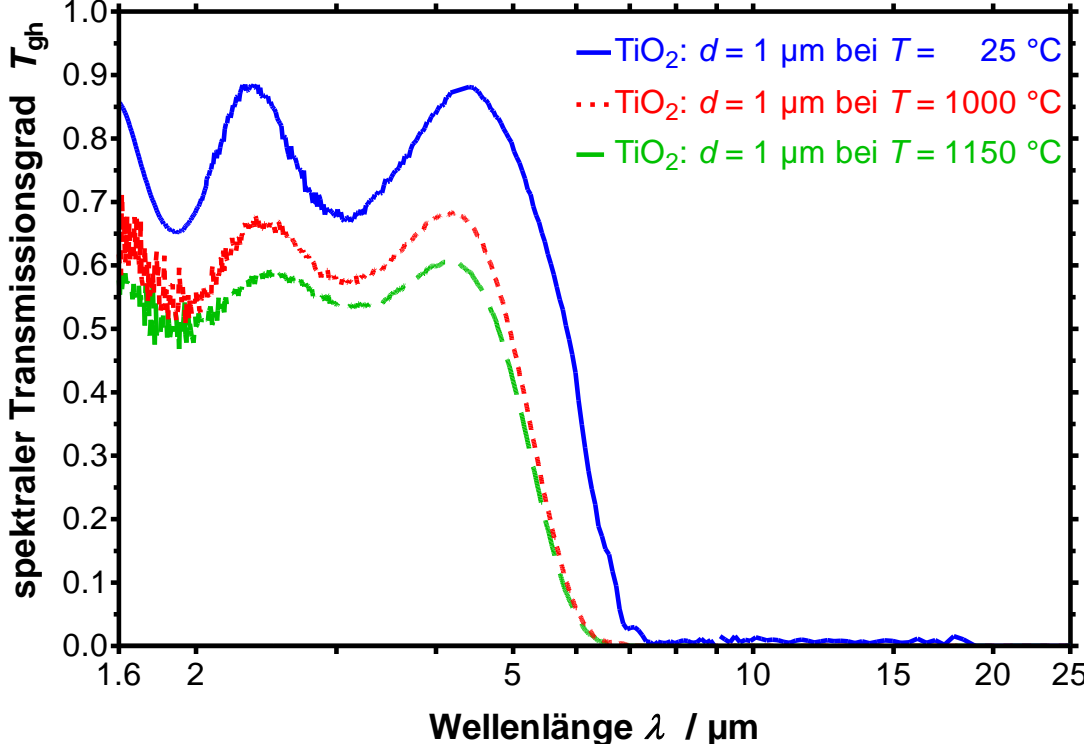
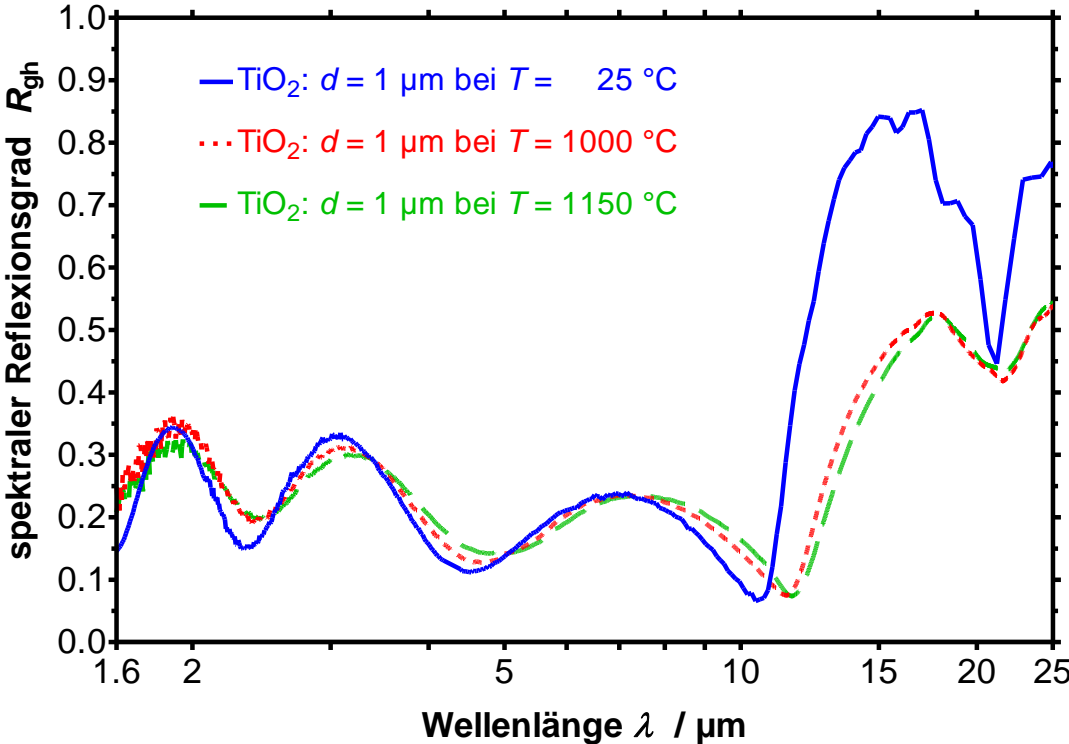
Al₂O₃-Schicht mit m_2

Saphir-Substrat mit m_3

Al₂O₃-Einzelschicht auf Saphir-Substrat: Reflexionsgrad und Transmissionsgrad

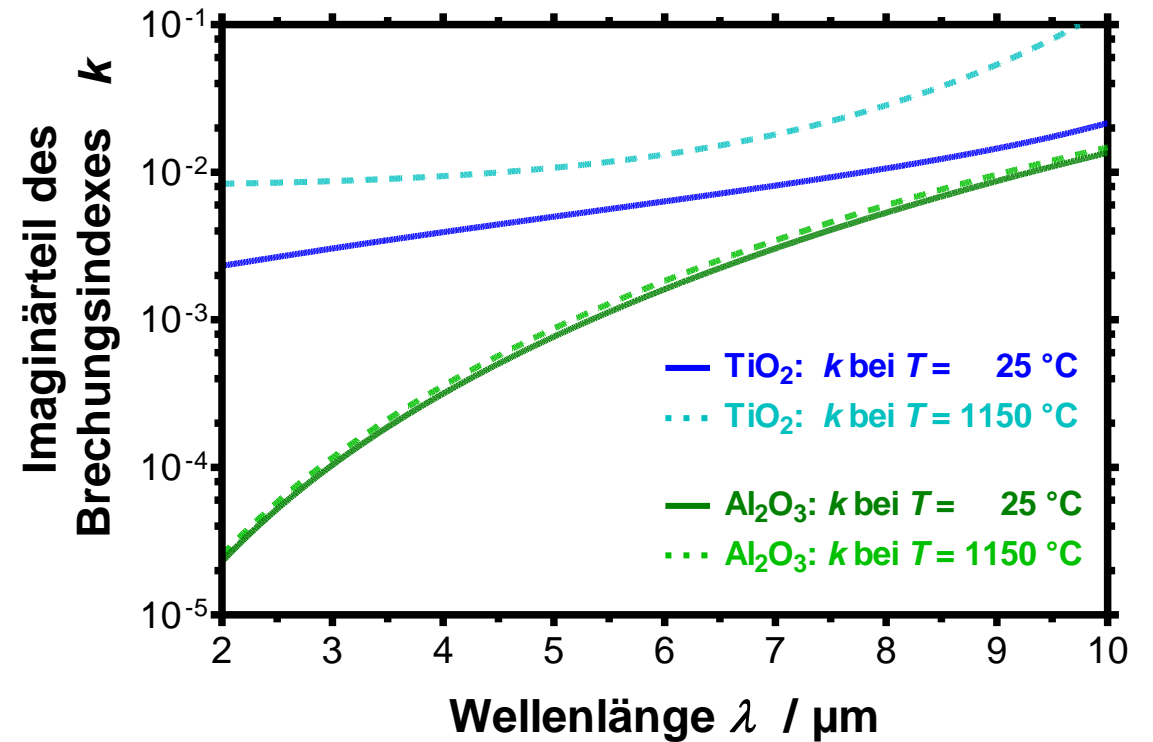
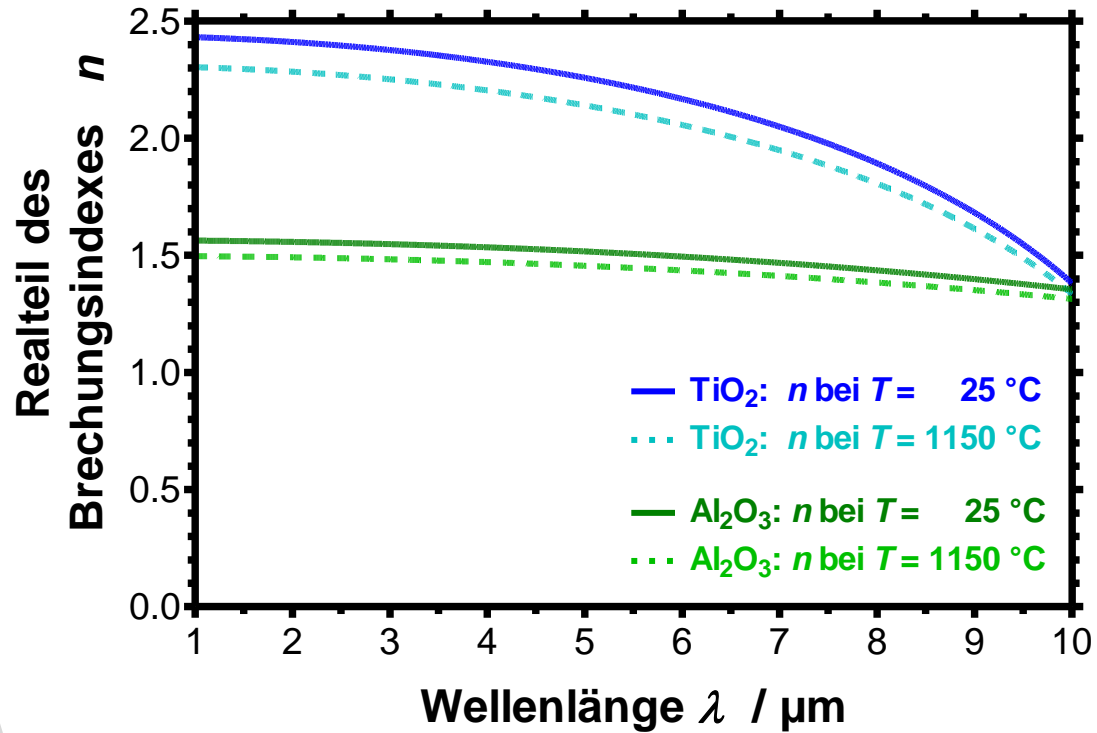


TiO₂-Einzelschicht auf Saphir-Substrat: Reflexionsgrad und Transmissionsgrad

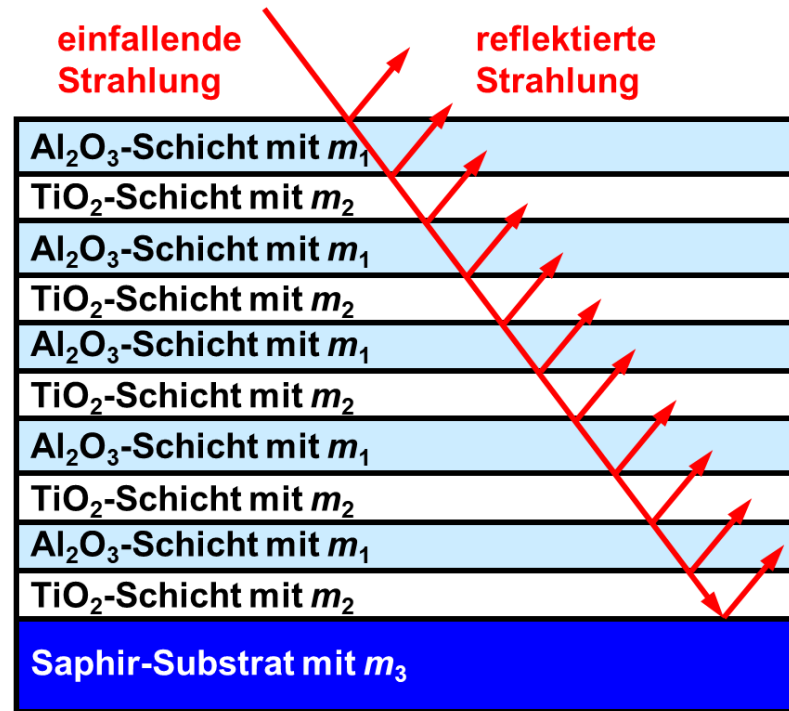


Komplexer Brechungsindex von TiO_2 und Al_2O_3

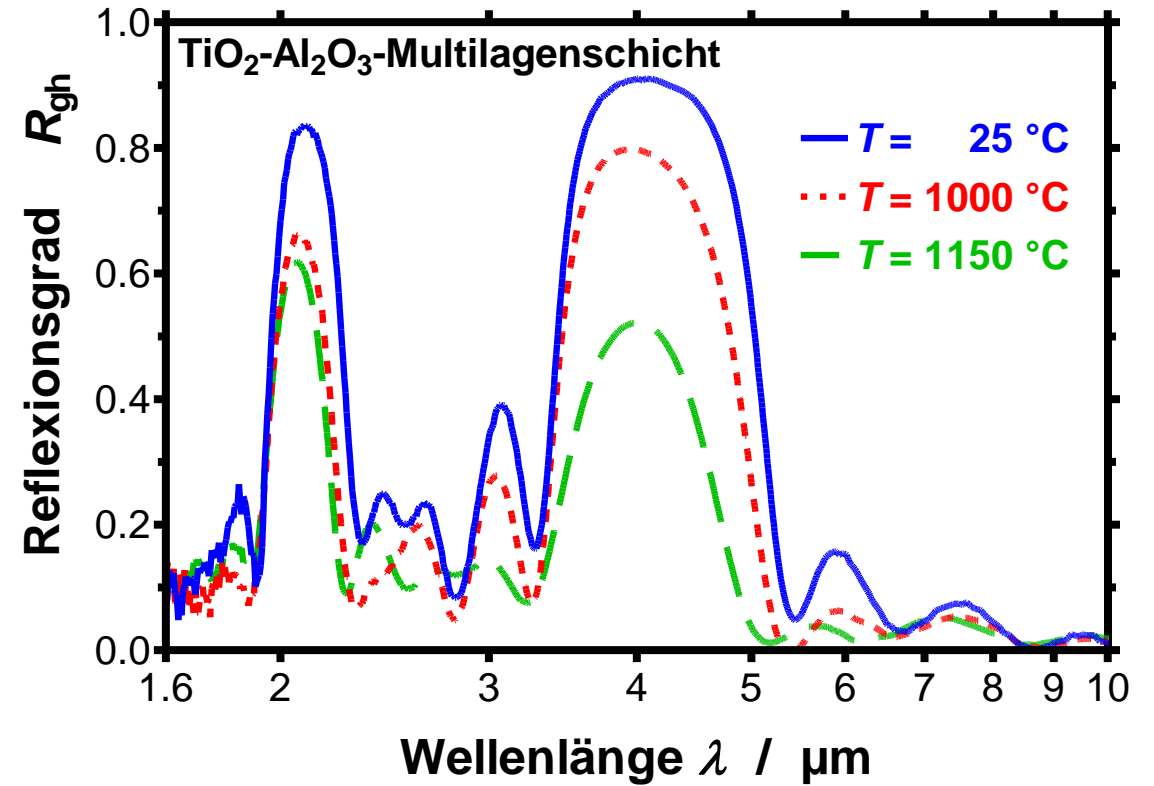
$$m(T) = n(T) + i \cdot k(T)$$



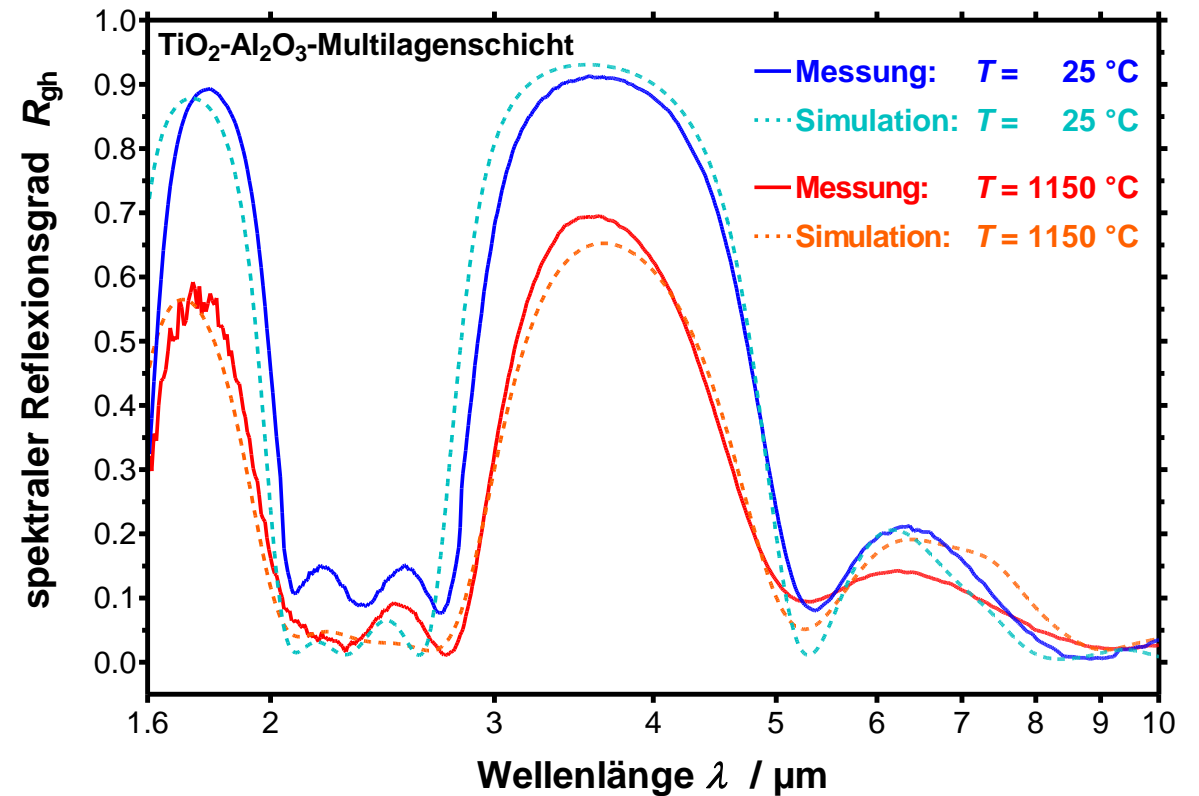
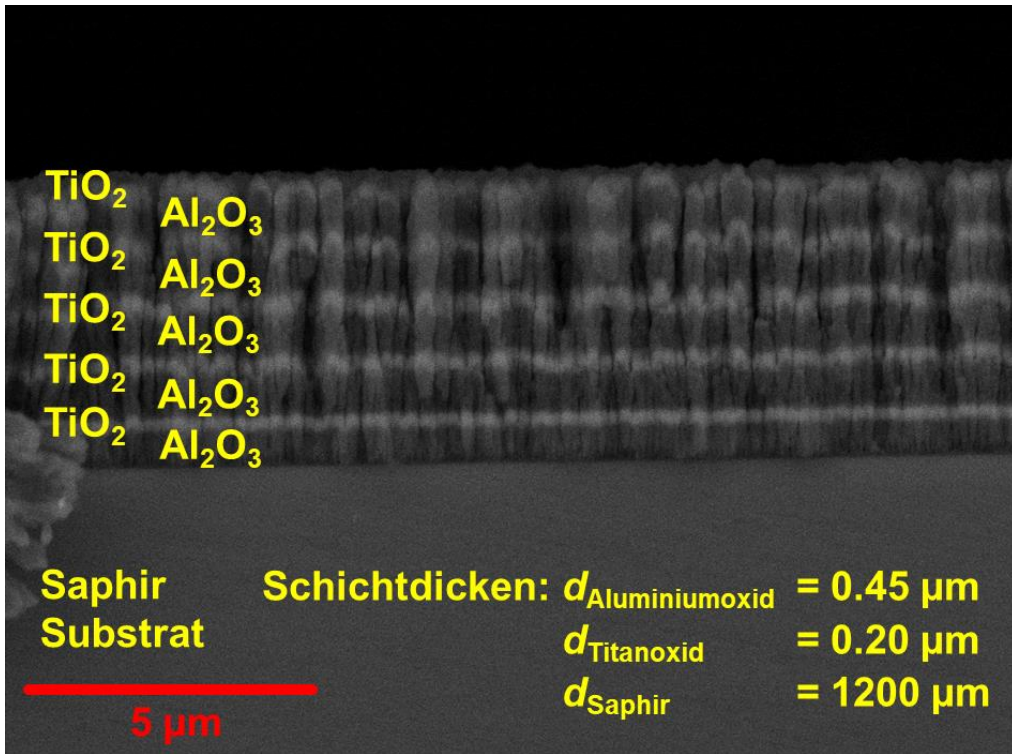
Spektral selektive Beschichtungen: Multilagenschicht aus alternierenden Einzelschichten



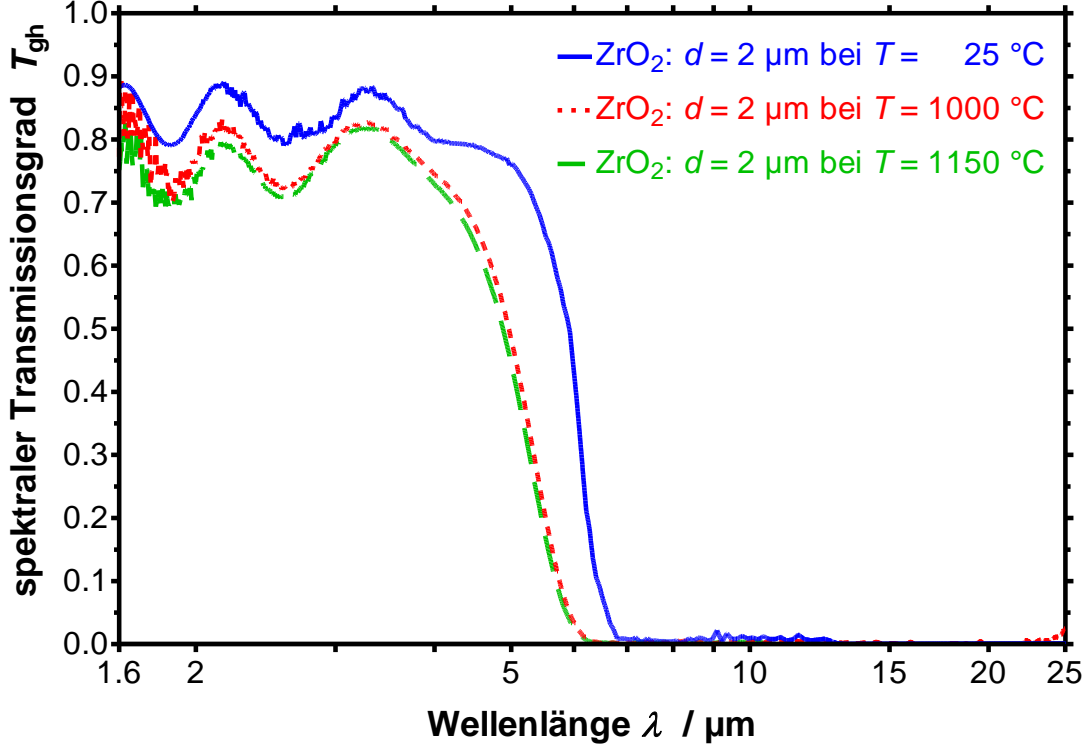
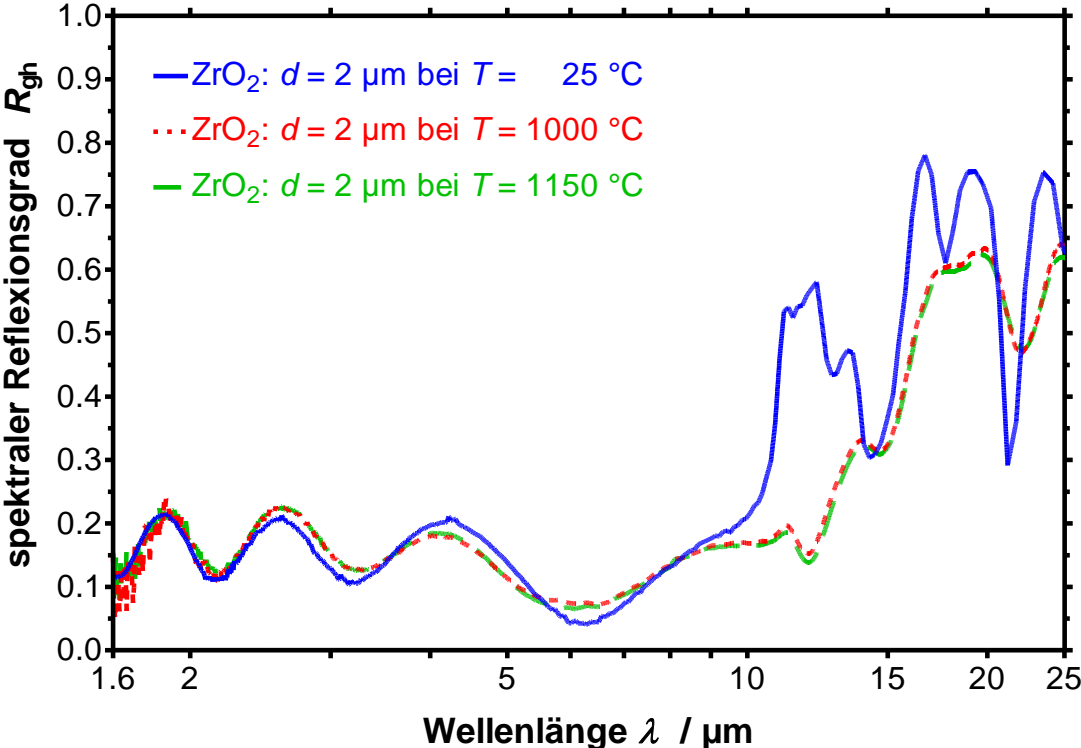
Schichtdicken: $d_{\text{Aluminiumoxid}} = 1 \mu\text{m}$
 $d_{\text{Titanoxid}} = 0.3 \mu\text{m}$
 $d_{\text{Saphir}} = 1200 \mu\text{m}$



Spektral selektive Beschichtungen: Multilagenschicht aus alternierenden Einzelschichten

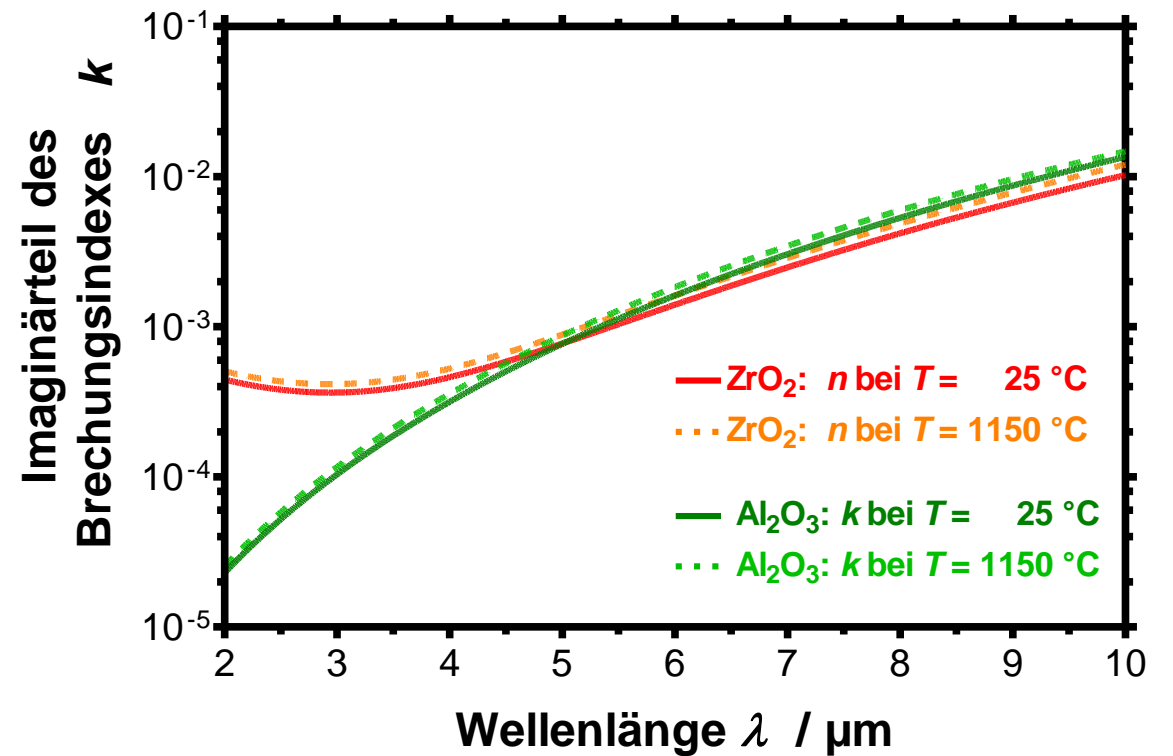
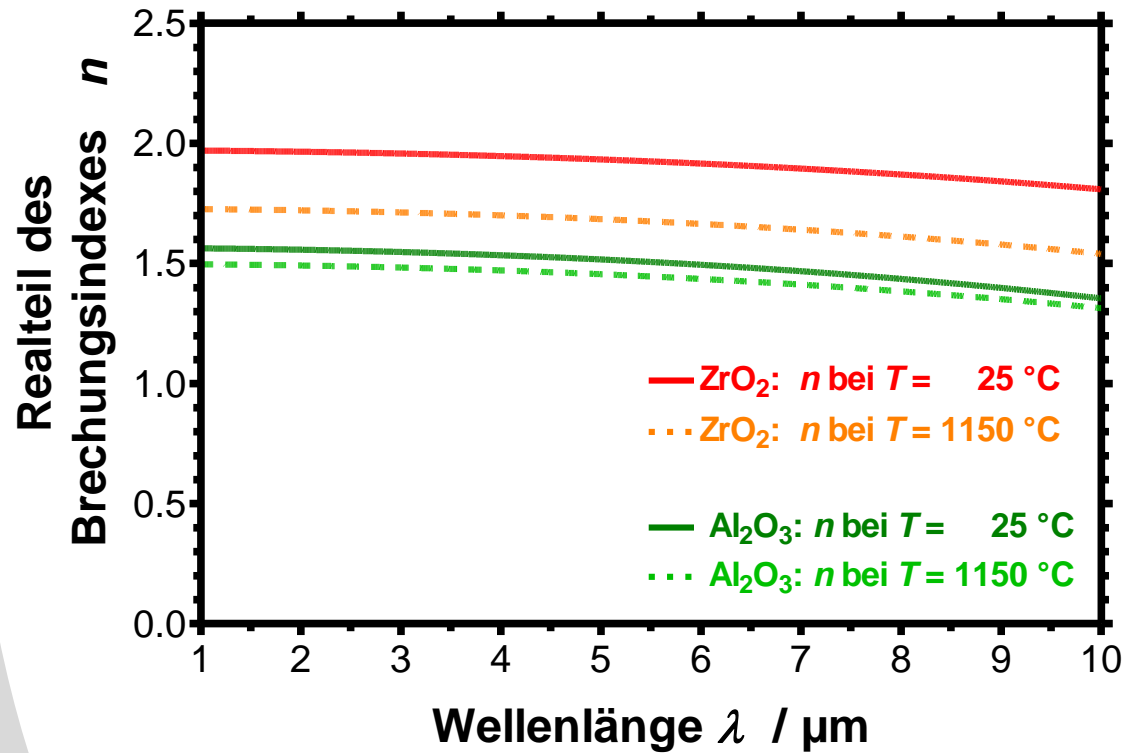


ZrO₂-Einzelschicht auf Saphir-Substrat: Reflexionsgrad und Transmissionsgrad

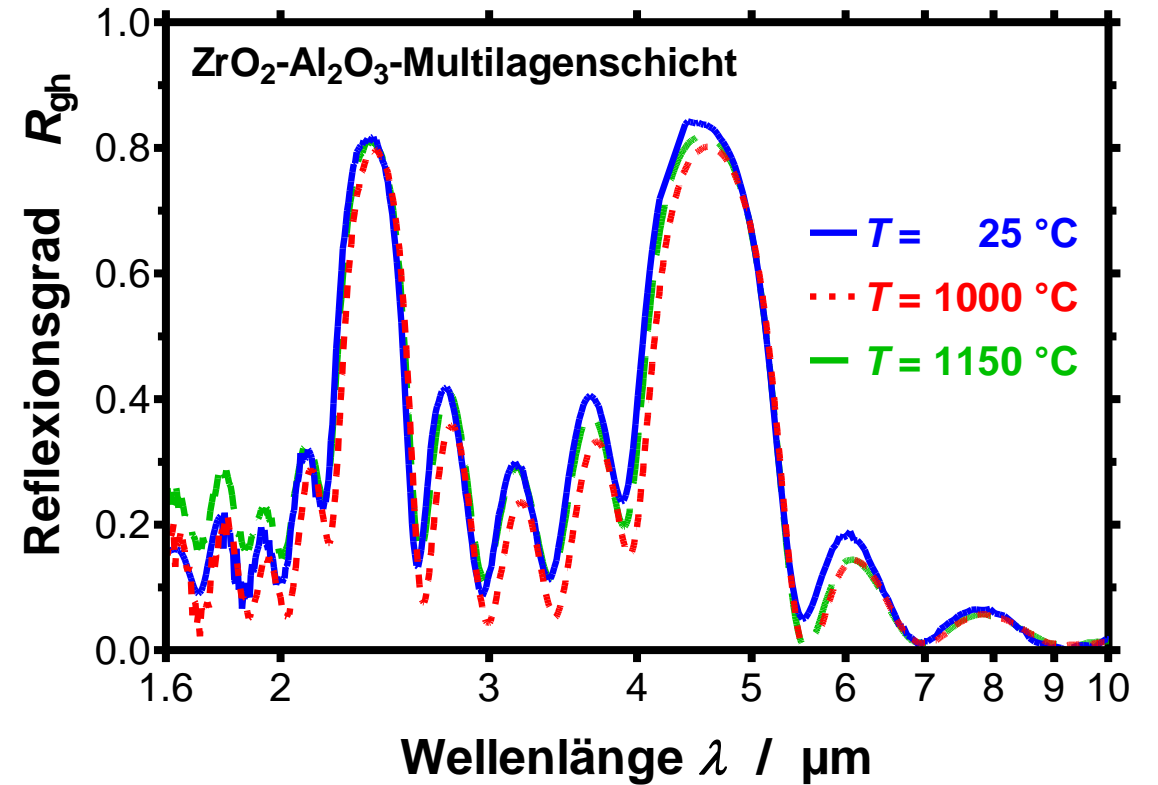
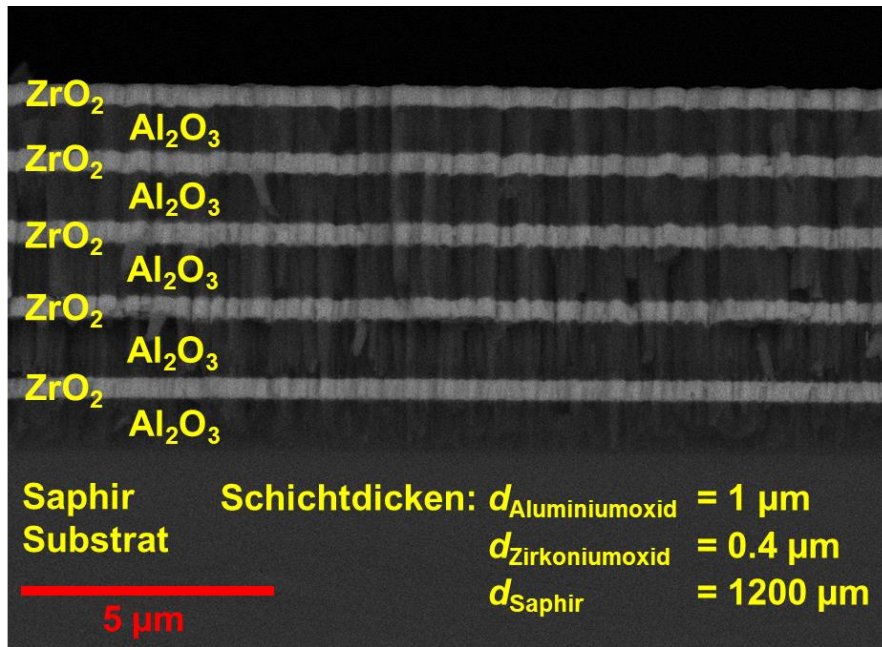


Komplexer Brechungsindex von ZrO_2 und Al_2O_3

$$m(T) = n(T) + i \cdot k(T)$$



Spektral selektive Beschichtungen: Multilagenschicht aus alternierenden Einzelschichten



Präparation und Simulation der Schichtsysteme durch Montanuniversität Leoben

- Beschichtung mittels Magnetron-Sputtern
- Beschichtung auf transparente Substrate sowie TBCs

Präparation von TBC-Schichten von der DLR und Bereitstellung Substrate von der Lufthansa Technik AG

- Thermal Barrier Coatings (TBCs)
- Environmental Barrier Coatings (EBCs)

Charakterisierung der Schichtsysteme am CAE bei hohen Temperaturen

- Bestimmung der komplexen Brechungsindizes
- Bestimmung des spektralen Emissions-, Reflexions- und Transmissionsgrades

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

Diese Arbeit wurde gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms (LuFo) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages (FKZ 20T1718A-C).

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages