

Transparente low-e Beschichtungen auf Basis von Silbernanodrähten

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

Passive Strahlungskühlung

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

Charakterisierung der infrarot-optischen Eigenschaften

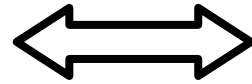
- Durchführung von spektrometrischen Messungen
- Bestimmung von solarem Absorptionsgrad und IR-Emissionsgrad

Bestimmung der Performance unter realen Bedingungen

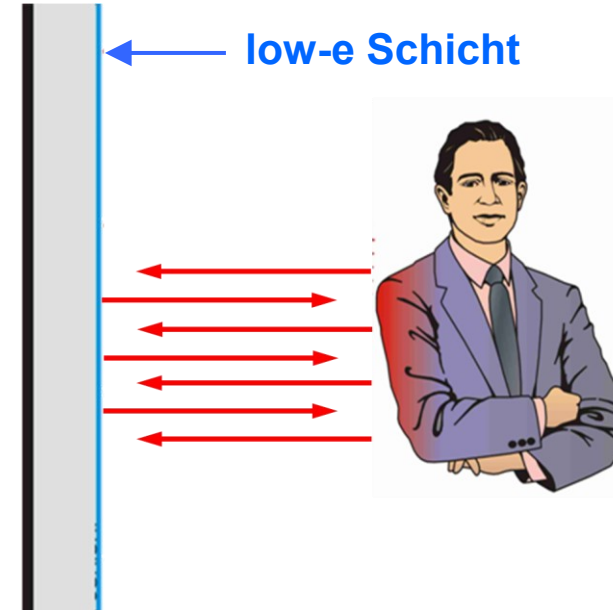
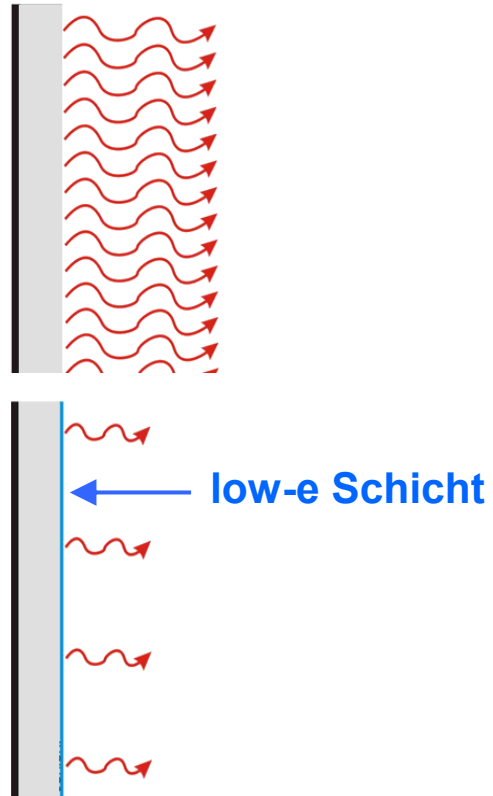
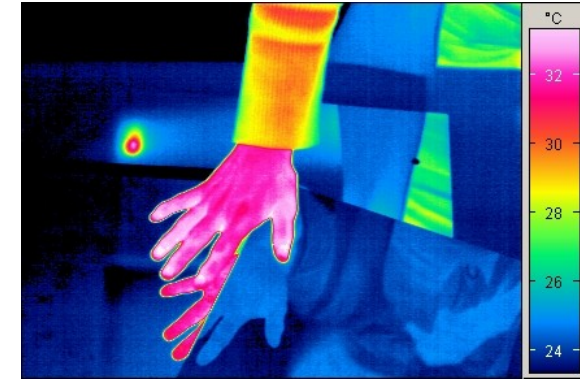
- Bestimmung der Unterkühlung unter die Umgebungstemperatur
- Bestimmung der Kühlleistung

Low-e Oberflächen mit geringem Emissionsgrad ε

Verminderung der Wärmeabstrahlung



Erhöhung der Wärmereflexion



Low-e Oberflächen im Gebäudebereich

Verbesserung der Wärmedämmung

- Verminderung des Strahlungsaustausches

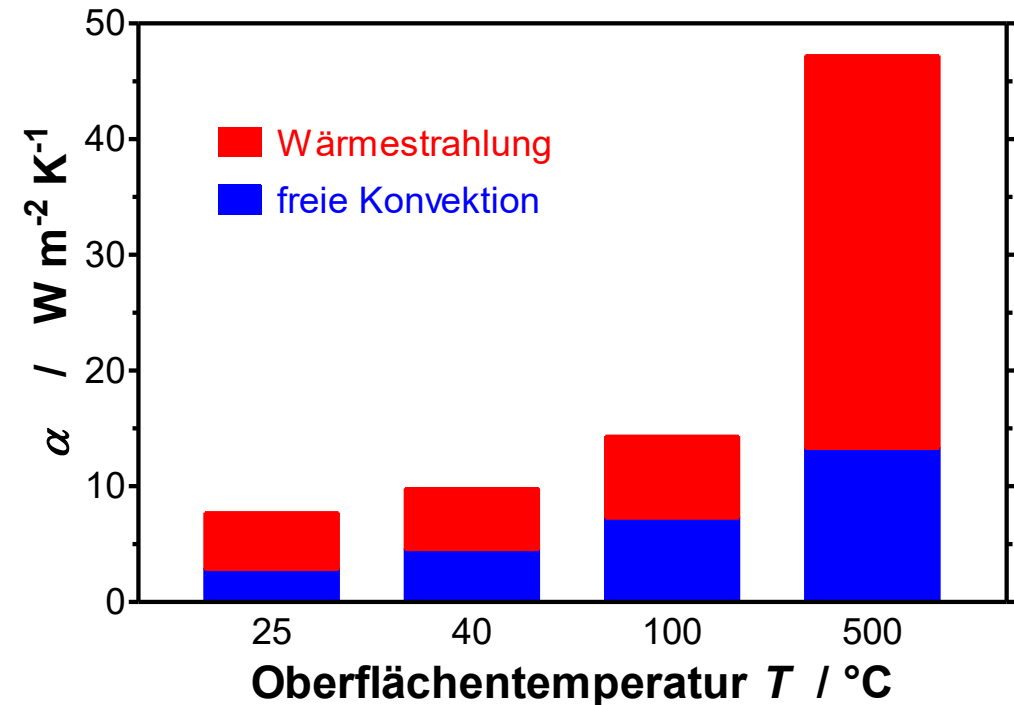
→ Reduktion des U -Wertes

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{\alpha_{\text{innen}}} + \frac{1}{\Lambda} + \frac{1}{\alpha_{\text{außen}}}$$

U : Wärmedurchgangskoeffizient

Λ : Wärmedurchlasskoeffizient

α : Wärmeübergangskoeffizient



Verbesserung der Wärmedämmung

- Verminderung des Strahlungsaustausches
→ Reduktion des U -Wertes

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{\alpha_{\text{innen}}} + \frac{1}{\Lambda} + \frac{1}{\alpha_{\text{außen}}}$$

U : Wärmedurchgangskoeffizient

Λ : Wärmedurchlasskoeffizient

α : Wärmeübergangskoeffizient

Steigerung der thermischen Behaglichkeit

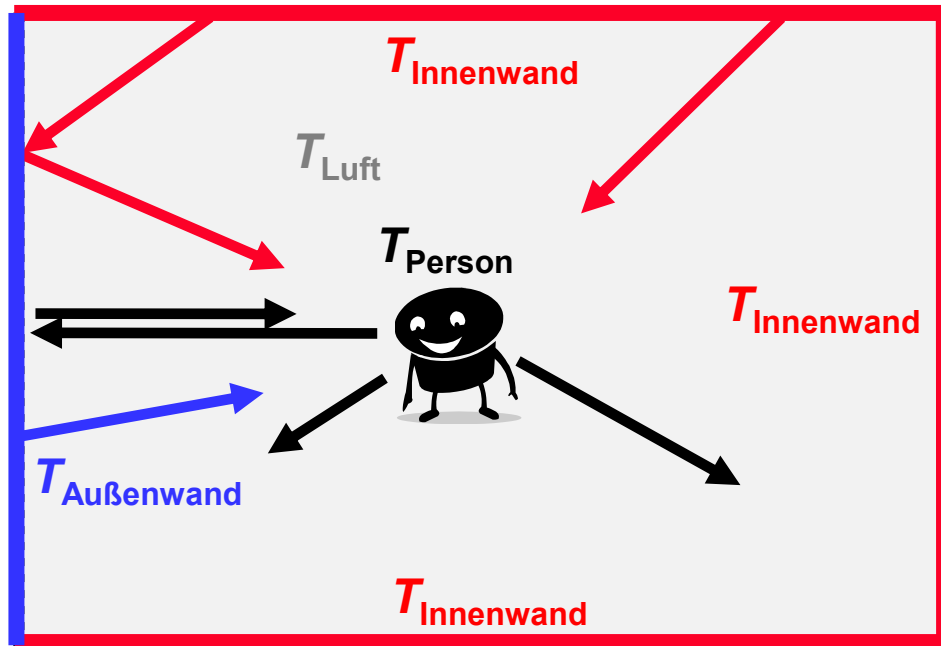
- Erhöhung der effektiven Strahlungstemperatur
→ Zunahme operativen Temperatur

$$T_O = \frac{\alpha_{\text{Konvektion}} \cdot T_{\text{Luft}} + \alpha_{\text{Strahlung}} \cdot T_{\text{Strahlung}}}{\alpha_{\text{Konvektion}} + \alpha_{\text{Strahlung}}}$$

T_O : operative Temperatur

T_{Luft} : Lufttemperatur

$T_{\text{Strahlung}}$: mittlere Strahlungstemperatur



Steigerung der thermischen Behaglichkeit

- Erhöhung der effektiven Strahlungstemperatur
→ Zunahme operativen Temperatur

$$T_O = \frac{\alpha_{\text{Konvektion}} \cdot T_{\text{Luft}} + \alpha_{\text{Strahlung}} \cdot T_{\text{Strahlung}}}{\alpha_{\text{Konvektion}} + \alpha_{\text{Strahlung}}}$$

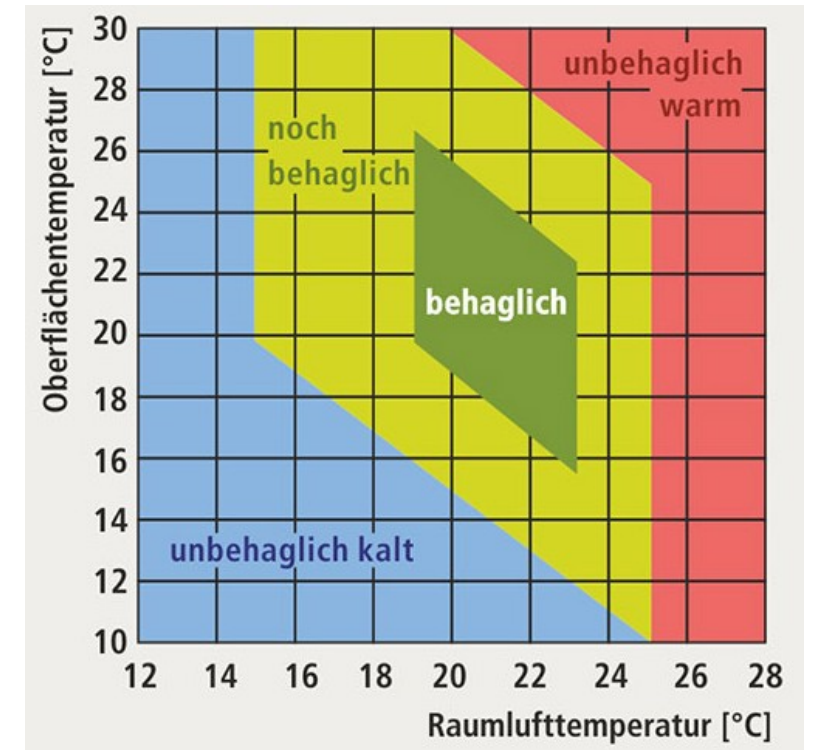
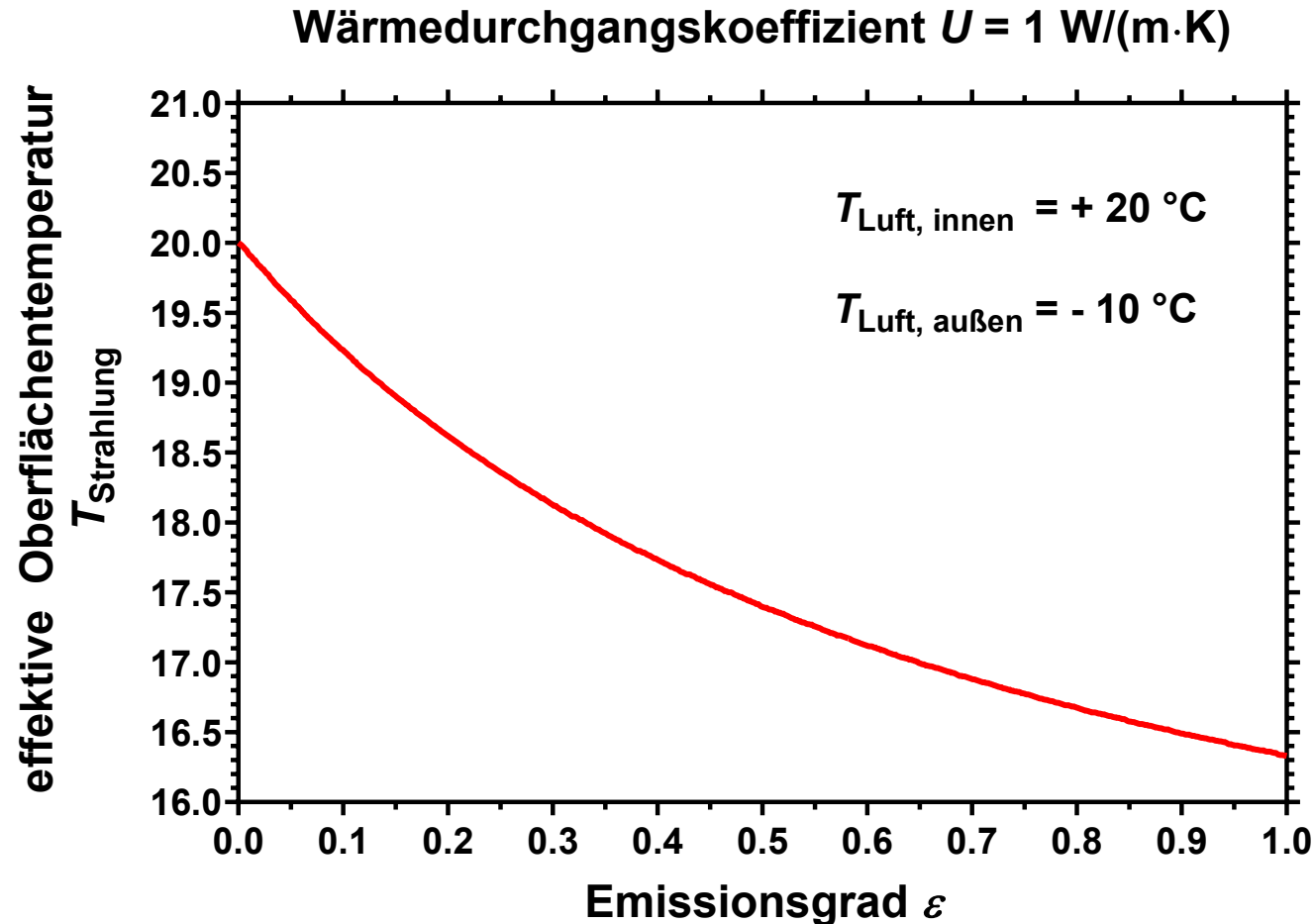
T_O : operative Temperatur

T_{Luft} : Lufttemperatur

$T_{\text{Strahlung}}$: mittlere Strahlungstemperatur

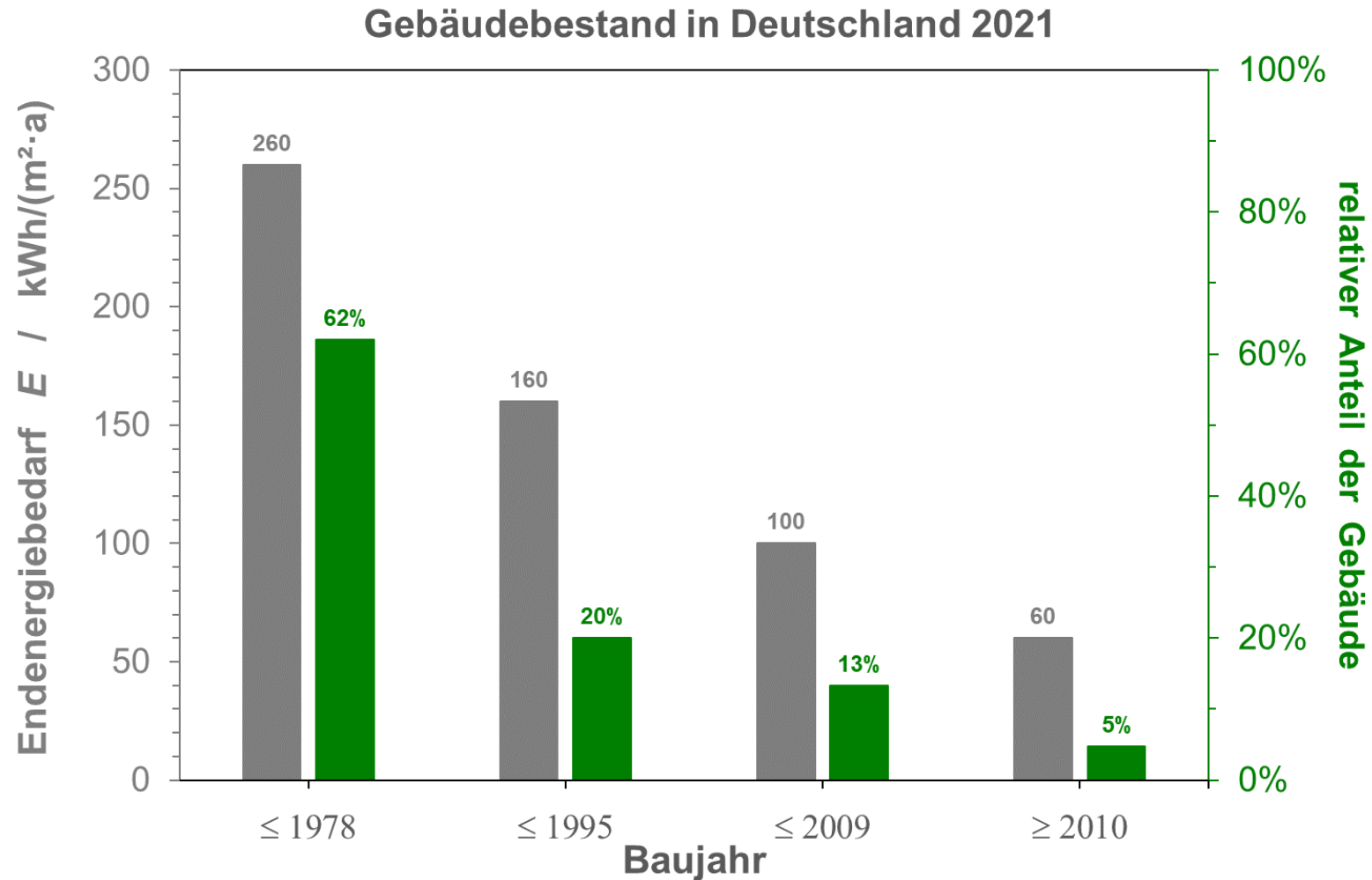
Steigerung der thermischen Behaglichkeit

Erhöhung der effektiven Strahlungstemperatur



Low-e Oberflächen im Gebäudebereich

Alter der Bausubstanz



Low-e Oberflächen im Gebäudebereich

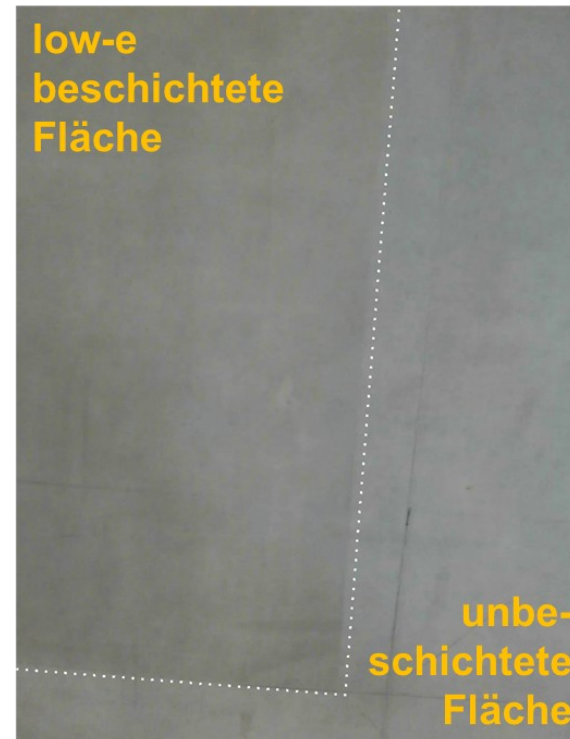
Verbesserung der Wärmedämmung der Bausubstanz

typischer Wandaufbau	Wärmedurchgangskoeffizient U / $W/(m^2 K)$	Reduktion des U -Wertes	
		$\varepsilon = 0.9$	$\varepsilon = 0.1$
Einfachverglasung	5.0	35 %	49 %
ungedämmter Altbau	3.0	24 %	37 %
bis 1977	2.0	18 %	28 %
bis 1995	1.5	14 %	23 %
bis 2009	0.50	5 %	9 %
ab 2009	0.24	2 %	4 %

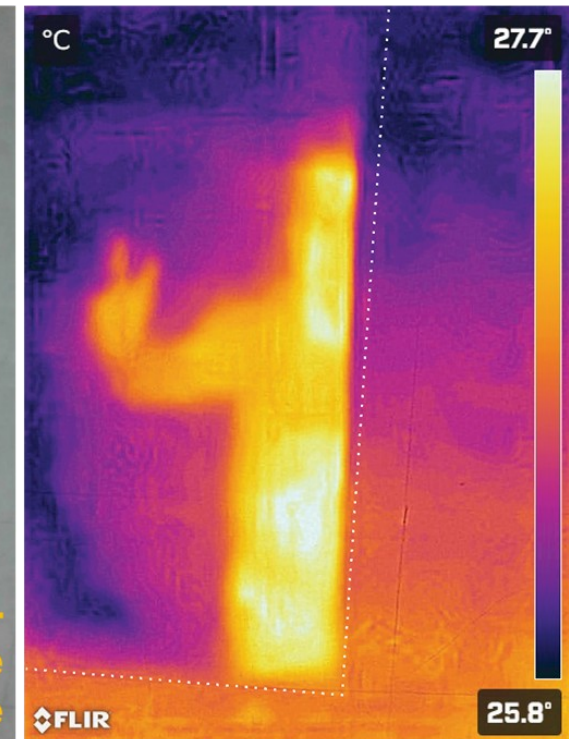
Energiespar-Lasur mit stabilisierten Silbernanodrähten für transparente low-e Wandanstriche



Innenwand mit
Sichtbetonoberfläche

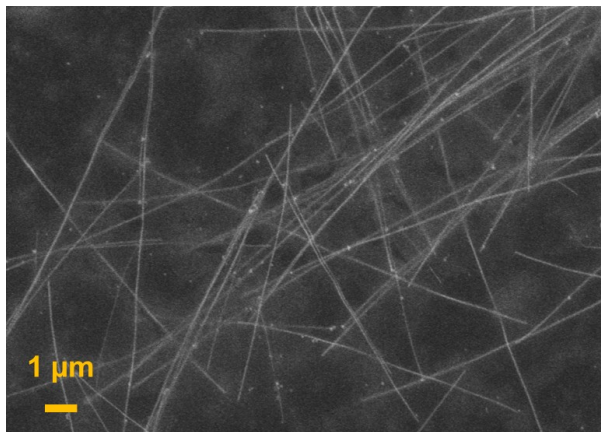
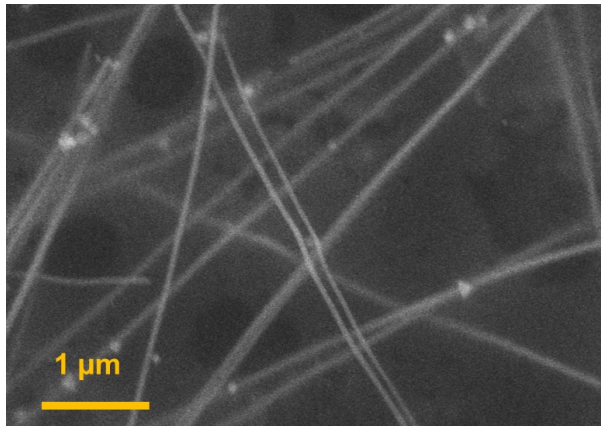


Wärmebild der
Sichtbetonoberfläche

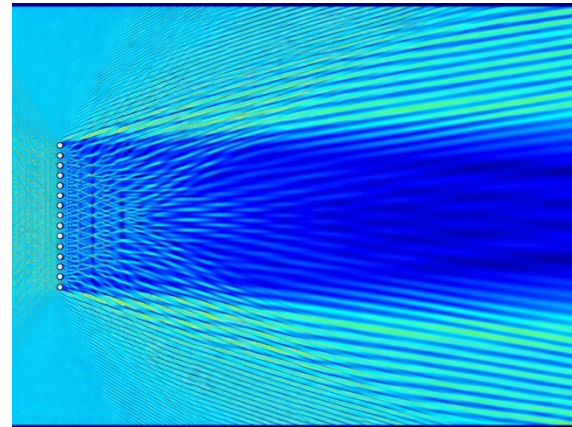


Perkolierendes Netzwerk aus Silbernanoströhen

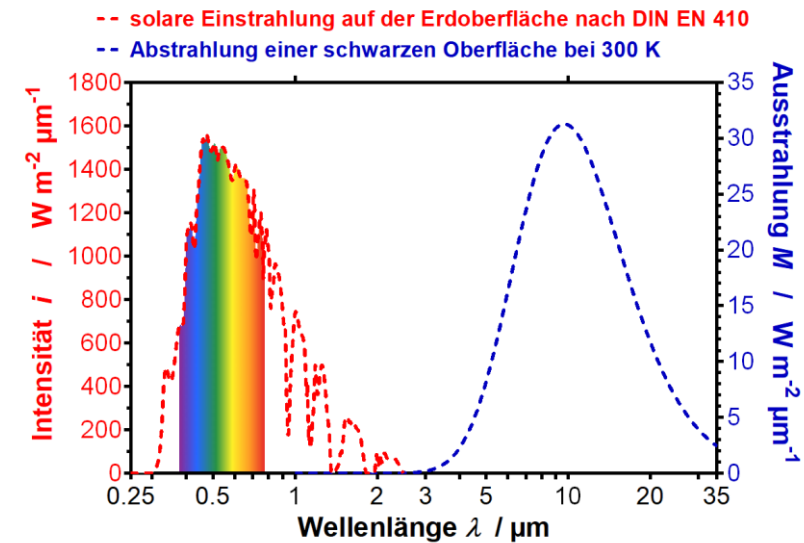
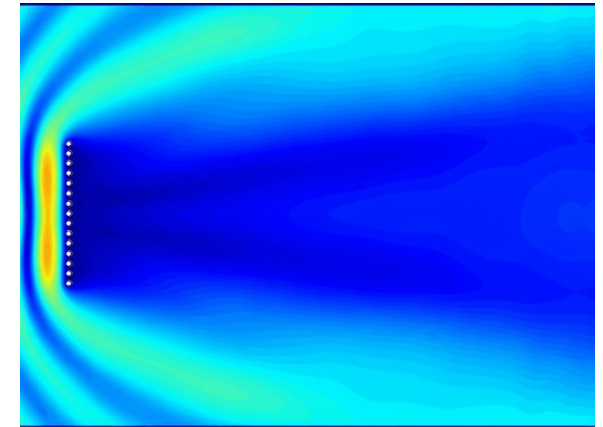
REM-Aufnahmen



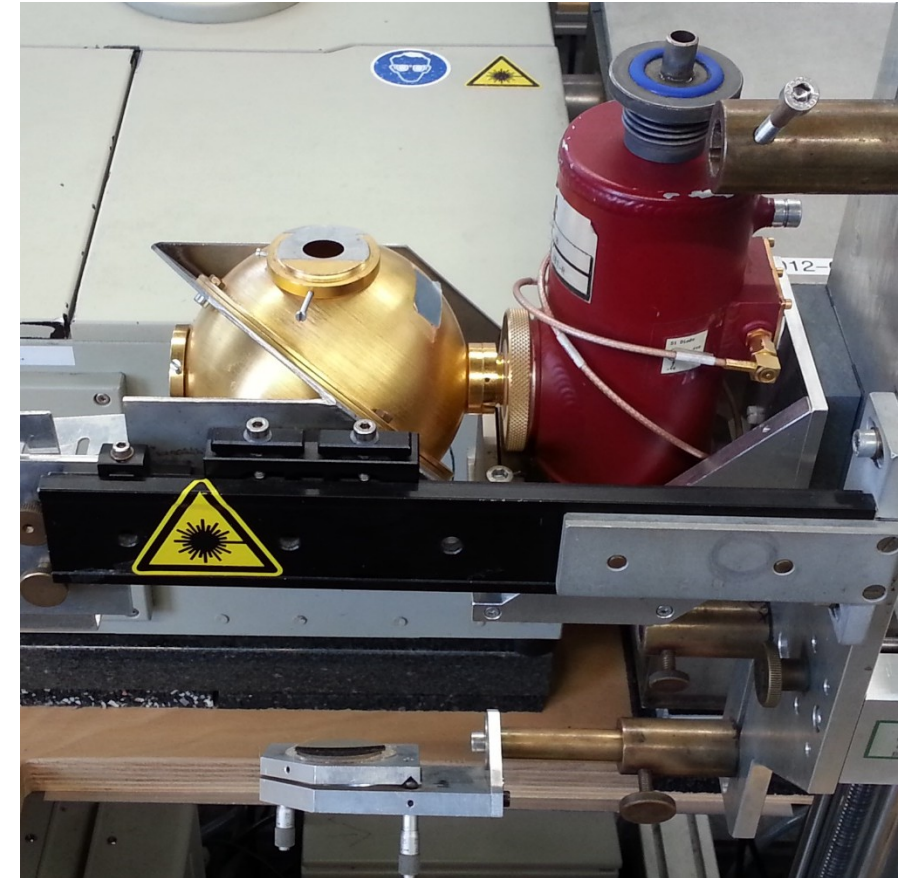
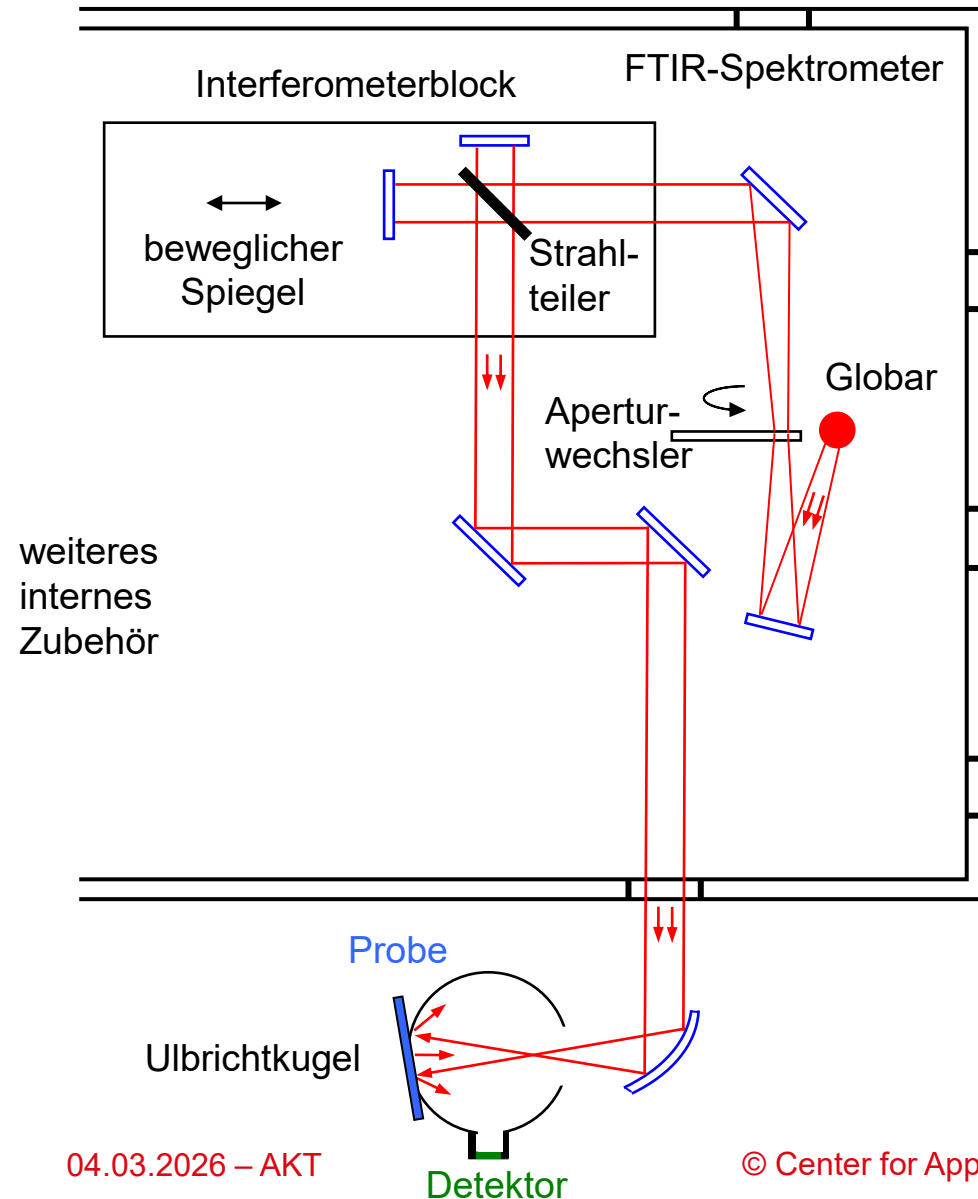
Licht (nm-Bereich)



Infrarot (µm-Bereich)



FTIR-Spektrometer mit Ulbrichtkugel

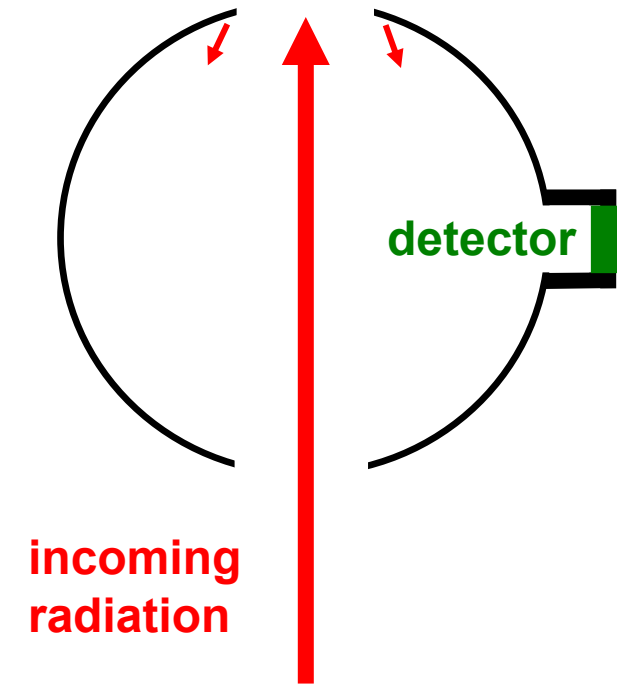
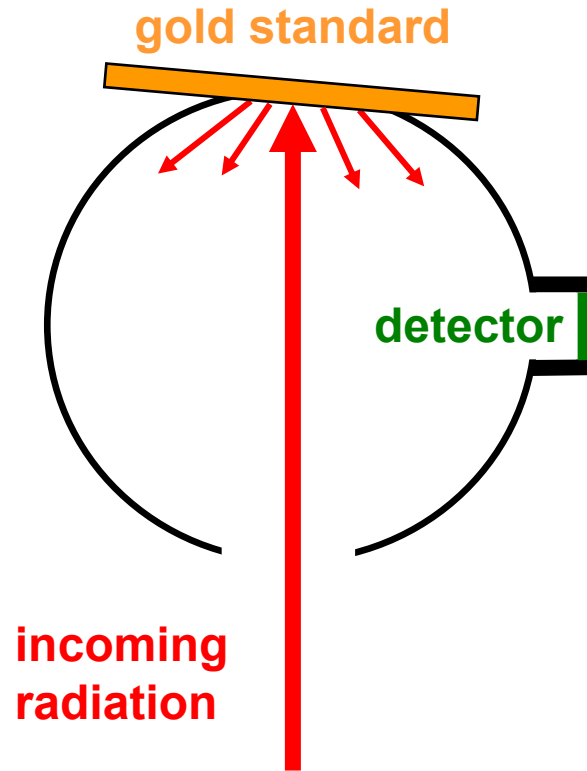
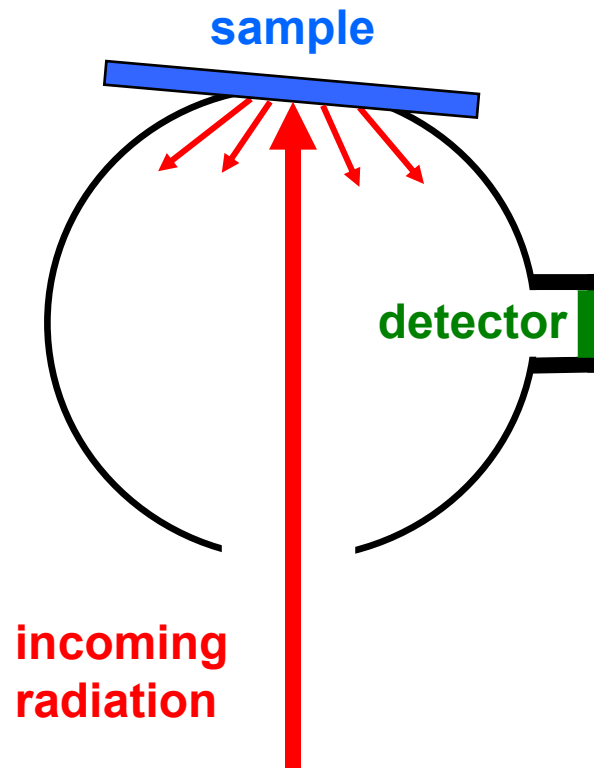


FTIR-Spektrometer mit Ulbrichtkugel

Bestimmung des gerichtet-hemisphärischen

Reflexionsgrades R_{gh}

$$R_{gh} + T_{gh} + \alpha_n = R_{gh} + T_{gh} + \varepsilon_n = 1$$

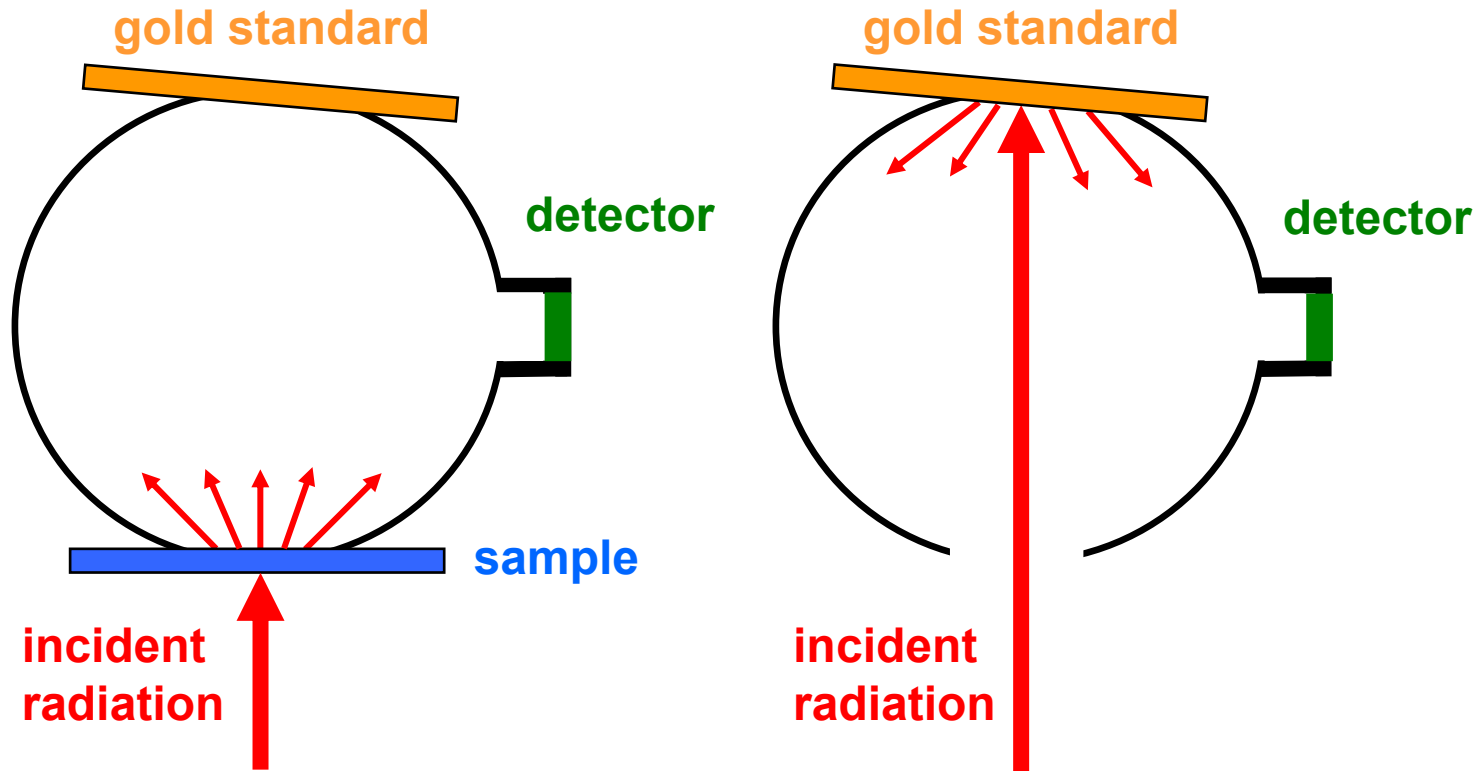


FTIR-Spektrometer mit Ulbrichtkugel

Bestimmung des gerichtet-hemisphärischen

Transmissionsgrades T_{gh}

$$R_{gh} + T_{gh} + \alpha_n = R_{gh} + T_{gh} + \varepsilon_n = 1$$



FTIR-Spektrometer mit Ulbrichtkugel

Bestimmung des normalen

Emissionsgrads ε_n

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

Visueller Transmissionsgrad $\chi(T)$
mit der spektralen Verteilung von Licht $D(\lambda)$
und dem Hellempfindlichkeitsgrad der Augen $S(\lambda)$

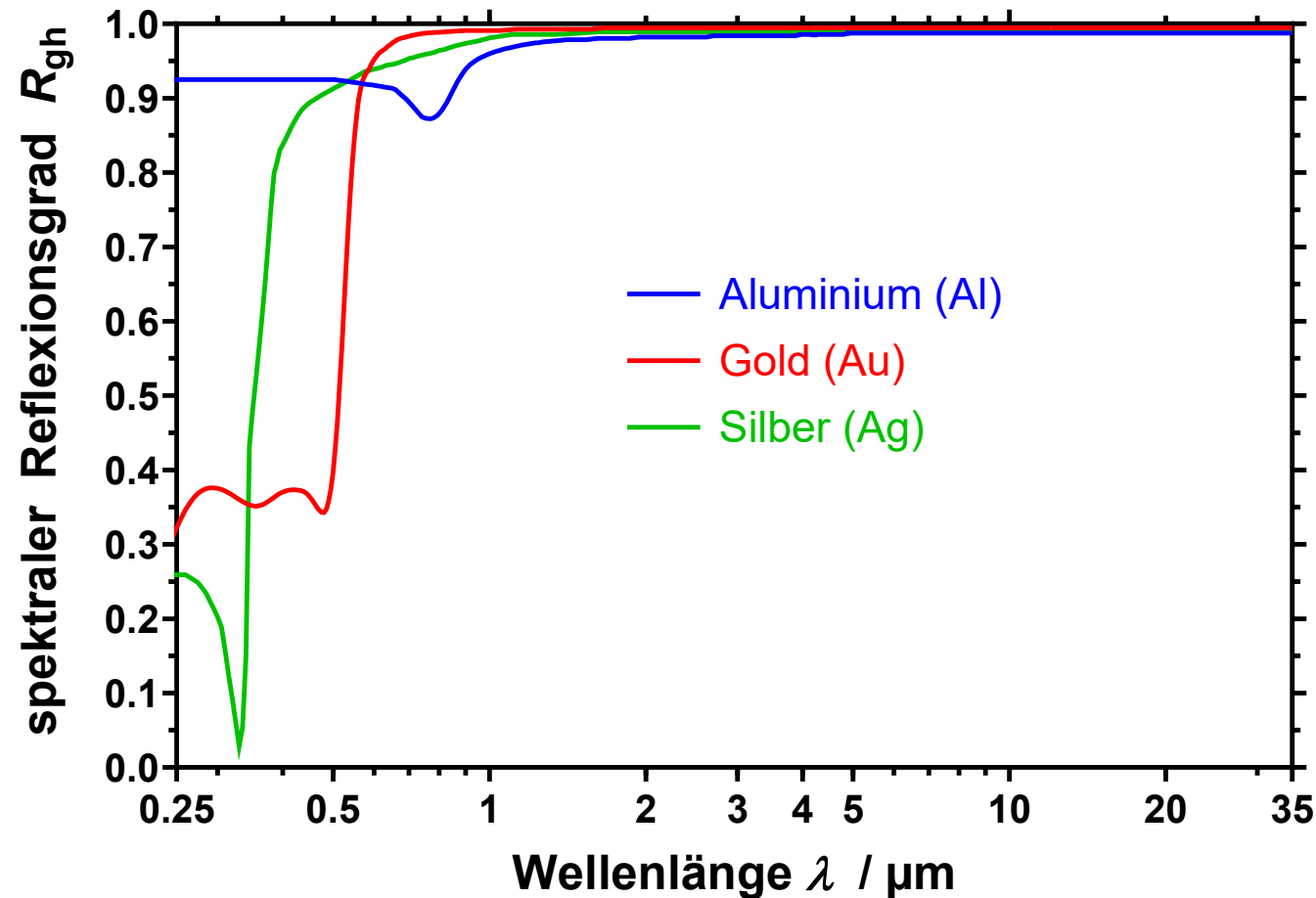
$$\begin{aligned}\varepsilon_n(\lambda, T) &= \alpha_n(\lambda, T) \\ &= 1 - R_{gh}(\lambda) - T_{gh}(\lambda)\end{aligned}$$

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

$$\tau_{vis}(T) = \frac{\int_{0.38}^{0.78} \tau_n(\lambda, T) \cdot D(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{0.38}^{0.78} D(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda}$$

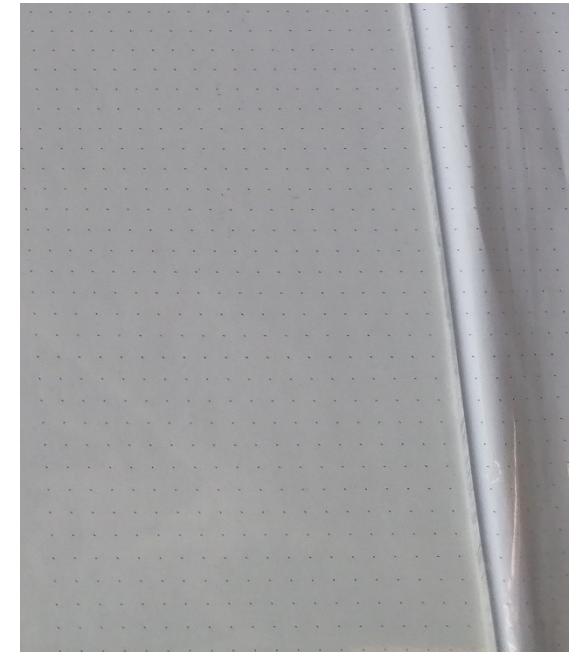
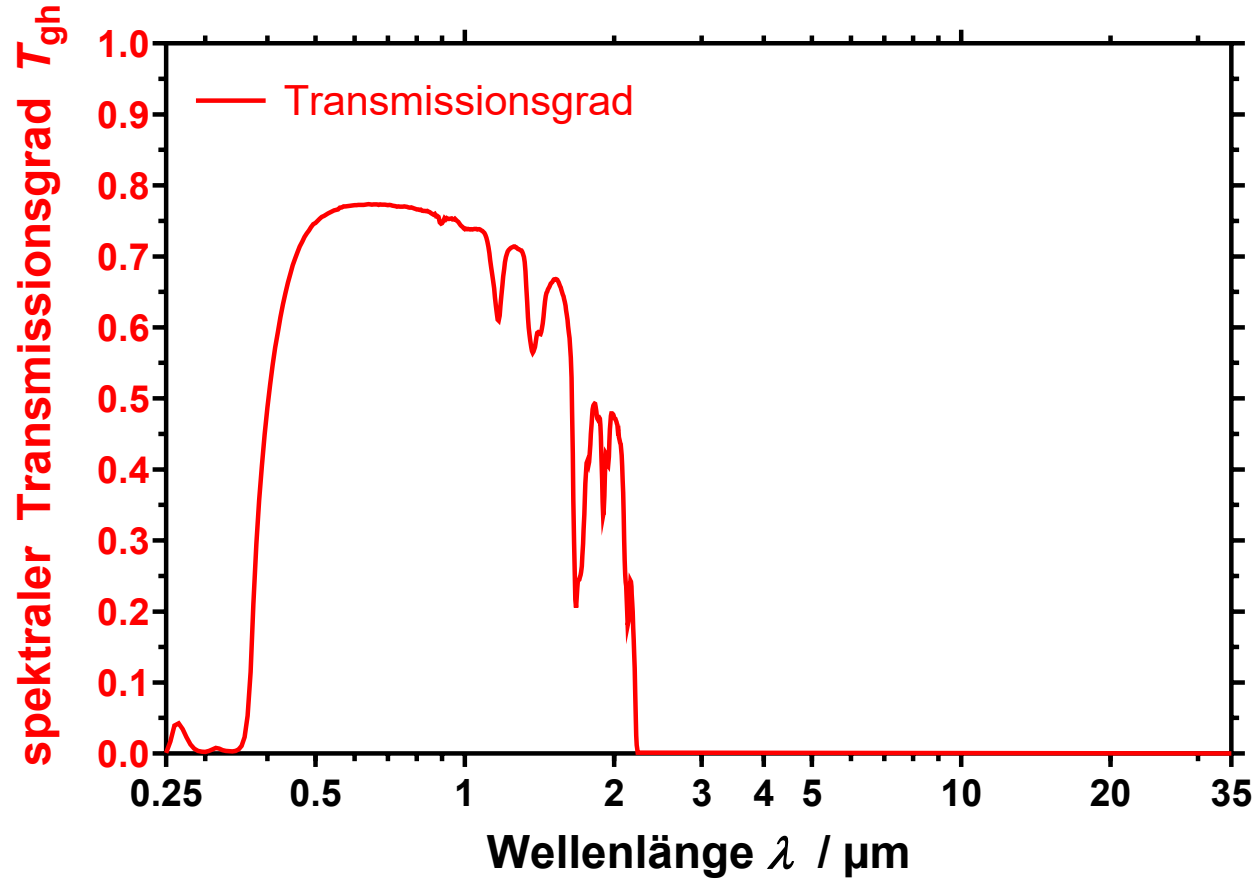
Reflexionsgrad polierter Metalloberflächen

Metalloberflächen weisen im Infrarot-Bereich sehr hohe Reflexionsgrade auf



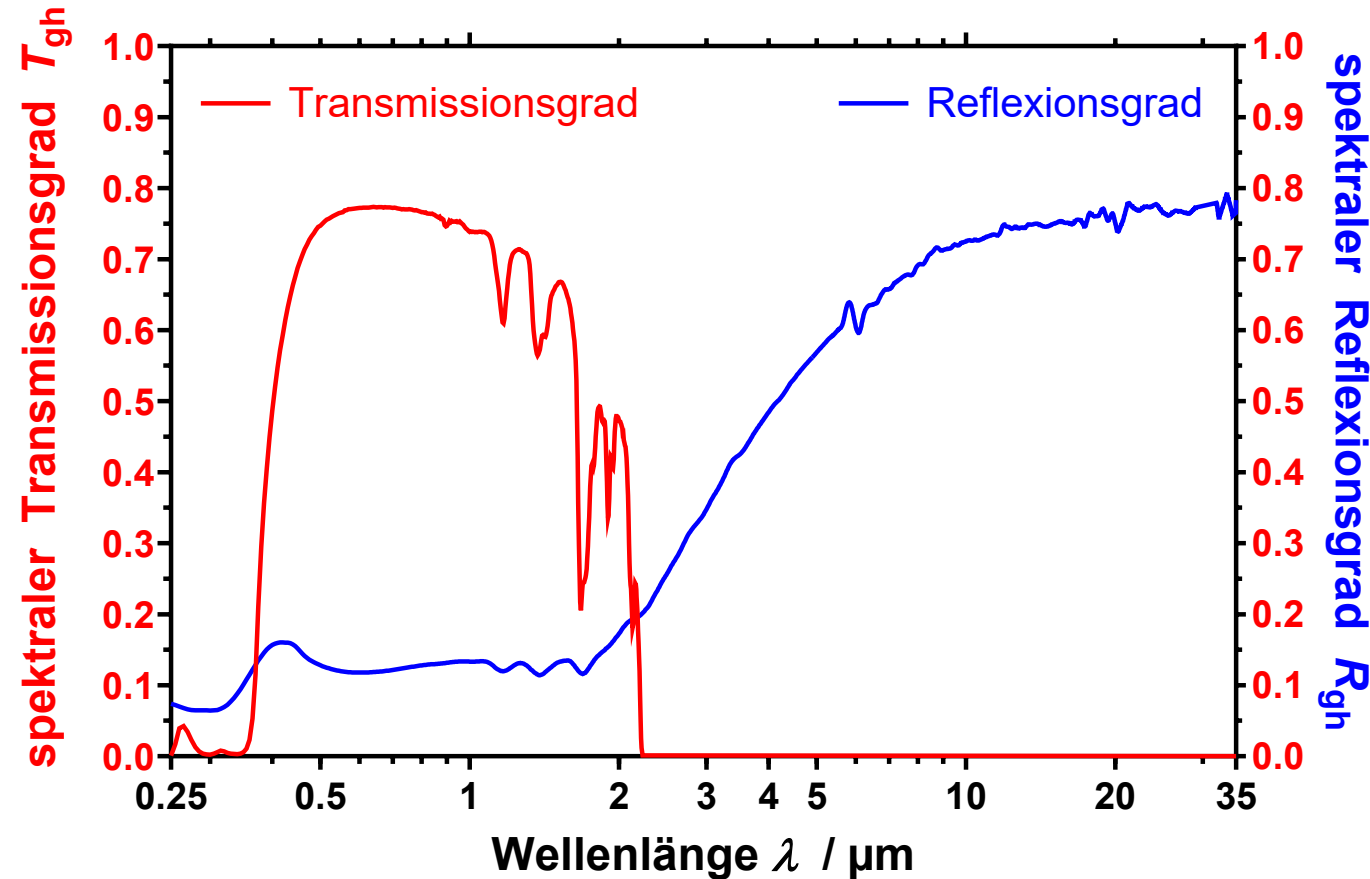
Transmissions- und Reflexionsgrad einer Silbernanodraht-Schicht

Silbernanodraht-Beschichtung auf PMMA-Substrat



Transmissions- und Reflexionsgrad einer Silbernanodraht-Schicht

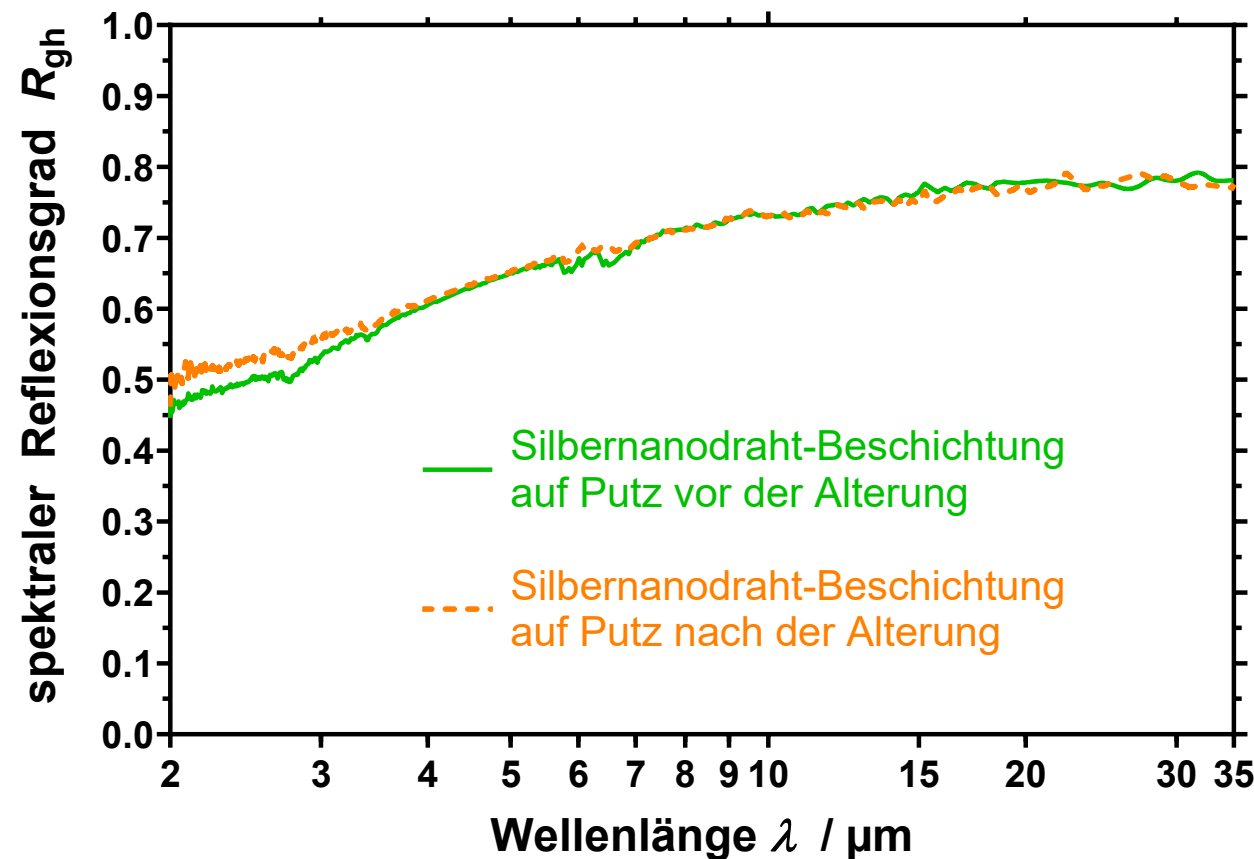
Silbernanodraht-Beschichtung auf PMMA-Substrat



visueller Transmissionsgrad τ_{vis}	normaler Gesamt-Emissionsgrad ε_n
0.763 ± 0.010	0.271 ± 0.010

Transmissions- und Reflexionsgrad einer Silbernanodraht-Schicht

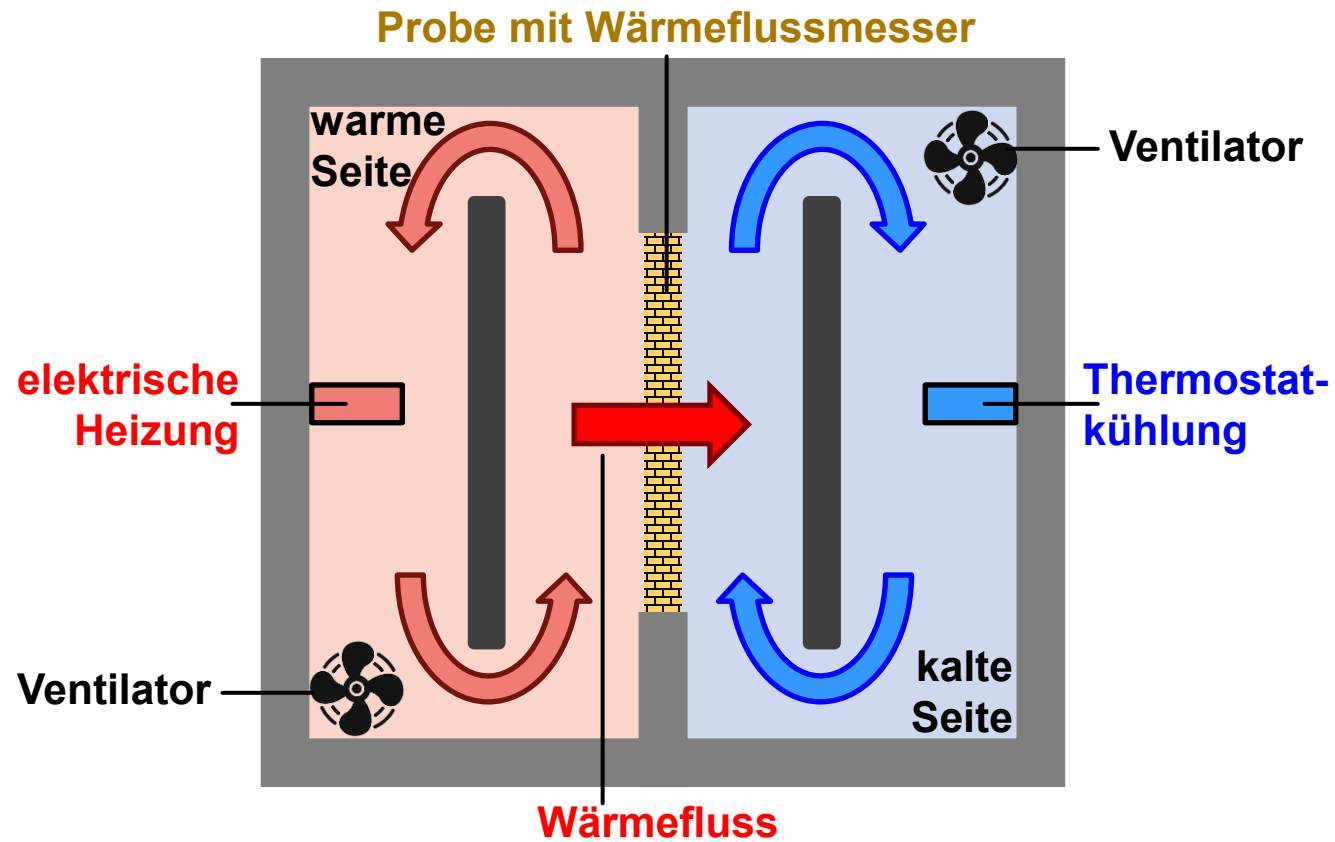
Silbernanodraht-Beschichtung auf PMMA-Substrat



beschleunigte Alterung	normaler Gesamt-Emissionsgrad ϵ_n
vor der Alterung	0.256 ± 0.010
nach der Alterung	0.258 ± 0.010

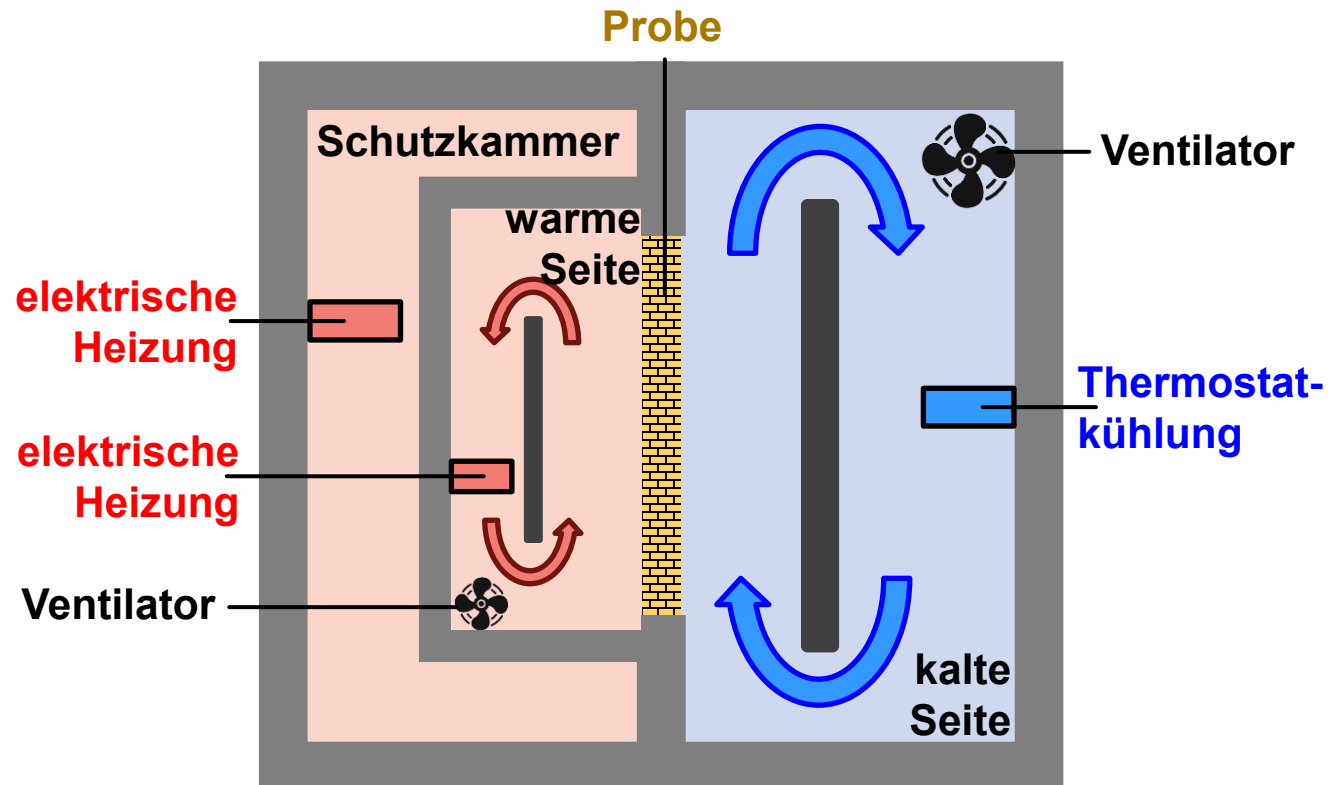
Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten U

Reduktion des U -Wertes durch Verminderung des Emissionsgrades



Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten U

Reduktion des U -Wertes durch Verminderung des Emissionsgrades



Deutscher Nachhaltigkeitspreis 2026 für HeiQ Xpectra

Deutscher Nachhaltigkeitspreis Produkte im Transformationsfeld Klima für HeiQ RAS AG

Partner:

- LEONHARD KURZ Stiftung & Co.KG
- maxit gruppe
- Center for Applied Energy Research e.V.

Eigenschaften

- Beschichtung reflektiert bis zu 74 % der Wärmestrahlung
→ Reduktion des Wärmedurchgangskoeffizienten
(U-Wert) im Bestand um bis zu 25 %
→ Senkung des Heiz- und Kühlbedarfs



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-zeroarbon.de

www.cae-zeroarbon.de



Dieses Projekt wird gefördert vom
Bundesministerium für Bildung und Forschung
(BMBF) aufgrund eines Beschlusses des
Deutschen Bundestages (FKZ 03DPS1208).

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages