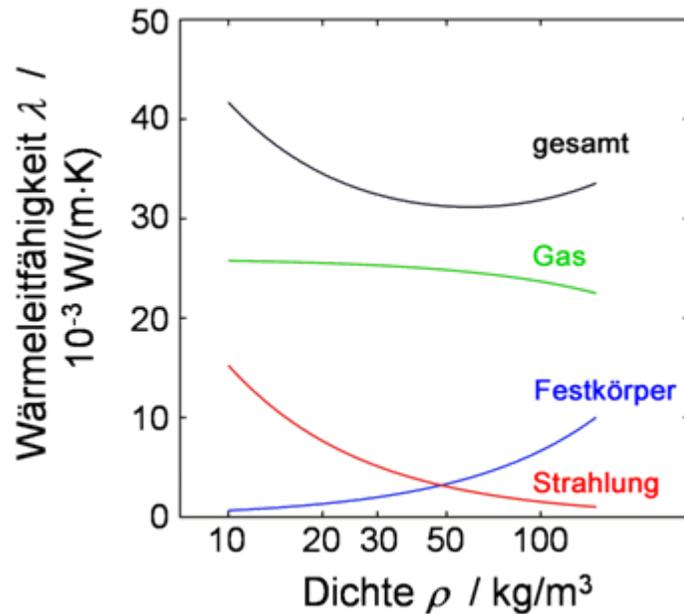


Reduktion des Strahlungstransports durch IR-Trübungsmittel

M. Rydzek, M.H. Keller, M. Arduini-Schuster, J. Manara

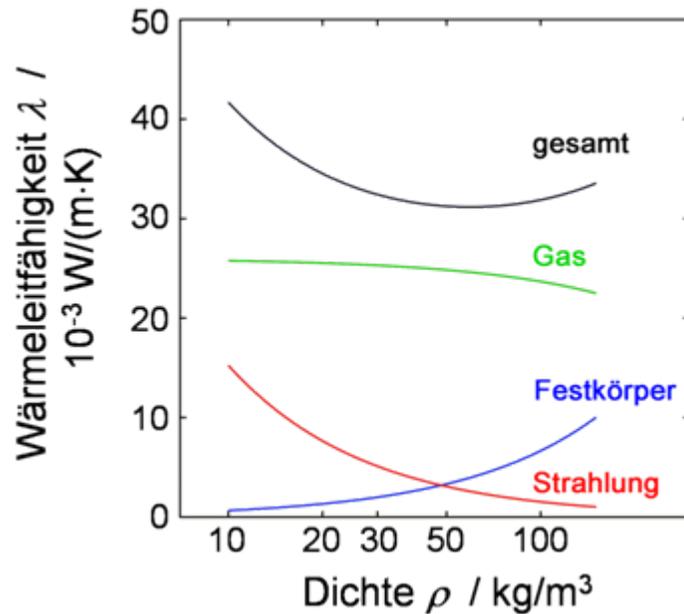
**Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung – Würzburg
(ZAE Bayern)**

Gesamt-Wärmeleitfähigkeit: $\lambda_{\text{ges}} = \lambda_{\text{FK}} + \lambda_{\text{Str}} + \lambda_{\text{Gas}} (+\lambda_{\text{Koppl}})$



Gesamt-Wärmeleitfähigkeit:

$$\lambda_{\text{ges}} = \lambda_{\text{FK}} + \lambda_{\text{Str}} + \lambda_{\text{Gas}} (+\lambda_{\text{Koppl}})$$



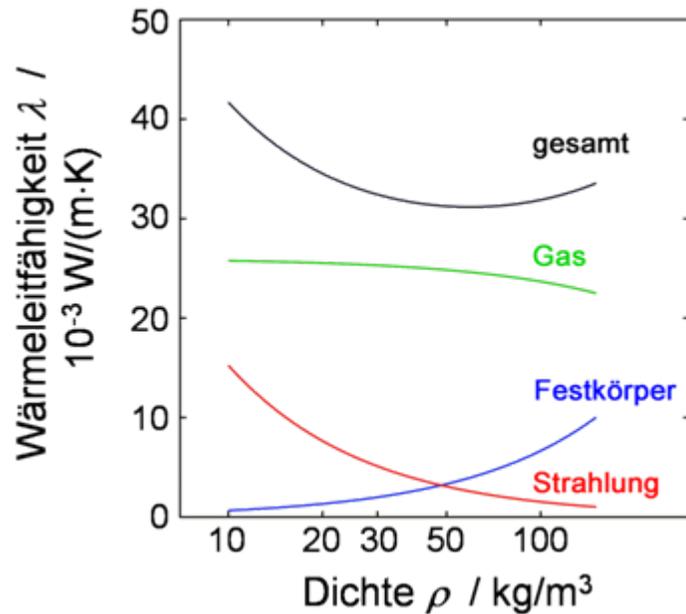
$$\lambda_{\text{Gas}} \approx \frac{1}{3} c_V \cdot \rho_g \cdot l_g \cdot v_g$$

$$\lambda_{\text{FK}} \approx \left(\frac{2}{3} - \frac{f_{\text{strut}}}{3} \right) \cdot \frac{\rho}{\rho_{0,\text{solid}}} \cdot \lambda_{0,\text{solid}}$$

$$\lambda_{\text{Str}} \approx \frac{16}{3} \cdot \frac{\sigma_{\text{SB}} \cdot n^2 \cdot T^3}{e^*(T) \cdot \rho}$$

Gesamt-Wärmeleitfähigkeit:

$$\lambda_{\text{ges}} = \lambda_{\text{FK}} + \lambda_{\text{Str}} + \lambda_{\text{Gas}} (+\lambda_{\text{Koppl}})$$

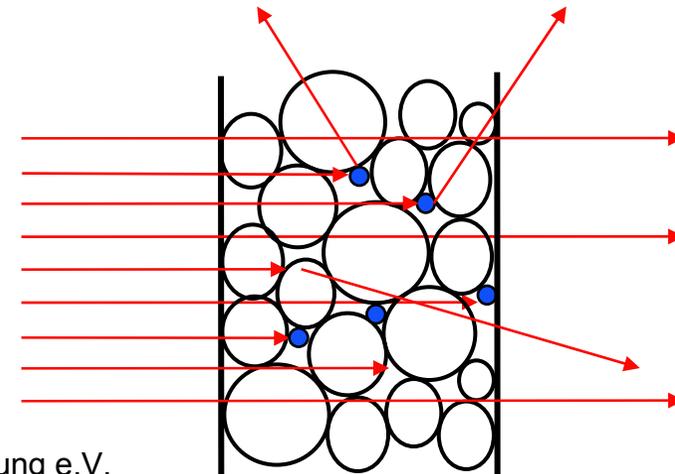


$$\lambda_{\text{Gas}} \approx \frac{1}{3} c_V \cdot \rho_g \cdot l_g \cdot v_g$$

$$\lambda_{\text{FK}} \approx \left(\frac{2}{3} - \frac{f_{\text{strut}}}{3} \right) \cdot \frac{\rho}{\rho_{0,\text{solid}}} \cdot \lambda_{0,\text{solid}}$$

$$\lambda_{\text{Str}} \approx \frac{16}{3} \cdot \frac{\sigma_{\text{SB}} \cdot n^2 \cdot T^3}{e^*(T) \cdot \rho}$$

→ Streuung und Absorption schwächen die einfallende Strahlung



Extinktionskoeffizient: $E = e^*(T) \cdot \rho$



Extinktionskoeffizient:

$$E = \frac{1}{l} = \frac{\tau}{x}$$

$$E = \frac{N}{V} \cdot C_{\text{ext}}$$

l = Mittlere freie Weglänge

x = Weglänge durch Probe

τ = optische Tiefe

$\frac{N}{V}$ = Teilchendichte

Extinktionskoeffizient und Wirkungsquerschnitt



ZAE BAYERN

Extinktionskoeffizient: $E = \frac{1}{l} = \frac{\tau}{x}$

$$E = \frac{N}{V} \cdot C_{\text{ext}}$$

l = Mittlere freie Weglänge

x = Weglänge durch Probe

τ = optische Tiefe

$\frac{N}{V}$ = Teilchendichte

Wirkungsquerschnitte:

$$C_{\text{streu}} = \frac{I_{\text{streu}}}{I_0} \cdot G \quad \longrightarrow \quad C_{\text{ext}} = C_{\text{streu}} + C_{\text{abs}} \quad \longleftarrow \quad C_{\text{abs}} = \frac{I_{\text{abs}}}{I_0} \cdot G$$

Albedo: $\omega_0 = \frac{C_{\text{streu}}}{C_{\text{ext}}} \quad 0 < \omega_0 < 1$



Extinktionskoeffizient: $E = \frac{1}{l} = \frac{\tau}{x}$

$$E = \frac{N}{V} \cdot C_{\text{ext}}$$

l = Mittlere freie Weglänge

x = Weglänge durch Probe

τ = optische Tiefe

$\frac{N}{V}$ = Teilchendichte

Wirkungsquerschnitte:

$$C_{\text{streu}} = \frac{I_{\text{streu}}}{I_0} \cdot G \quad \longrightarrow \quad C_{\text{ext}} = C_{\text{streu}} + C_{\text{abs}} \quad \longleftarrow \quad C_{\text{abs}} = \frac{I_{\text{abs}}}{I_0} \cdot G$$

Albedo: $\omega_0 = \frac{C_{\text{streu}}}{C_{\text{ext}}} \quad 0 < \omega_0 < 1$

Streutheorie: – Vorgabe materialspezifischer Parameter: – Partikelgrößenverteilung
– komplexer Brechungsindex (Teilchen und Umgebung)

→ Theoretische Berechnung der Wirkungsquerschnitte



STG: Abnahme spektraler Intensität im Medium mit optischer Tiefe

$$\frac{dI(\tau)}{d\tau} =$$

STG: Abnahme spektraler Intensität im Medium mit optischer Tiefe

Beiträge durch 4 Terme:

1) Absorption ↓



Strahlungstransportgleichung:

$$\frac{dI(\tau)}{d\tau} = -\frac{N}{V} \left(C_{\text{abs}} + \quad \right) I(\tau)$$

STG: Abnahme spektraler Intensität im Medium mit optischer Tiefe

Beiträge durch 4 Terme:

- 1) Absorption ↓
- 2) Streuung ↓



Strahlungstransportgleichung:

$$\frac{dI(\tau)}{d\tau} = -\frac{N}{V} (C_{\text{abs}} + C_{\text{streu}}) I(\tau)$$

STG: Abnahme spektraler Intensität im Medium mit optischer Tiefe

Beiträge durch 4 Terme:

- 1) Absorption ↓
- 2) Streuung ↓
- 3) Streuung in Beobachtungsrichtung ↑



Strahlungstransportgleichung:

$$\frac{dI(\tau)}{d\tau} = -\frac{N}{V} (C_{\text{abs}} + C_{\text{streu}}) I(\tau) + \frac{NC_{\text{streu}}}{4\pi V} \int_{4\pi} p(\tau, \Omega, \Omega') I(\tau, \Omega') d\Omega'$$

STG: Abnahme spektraler Intensität im Medium mit optischer Tiefe

Beiträge durch 4 Terme:

- 1) Absorption ↓
- 2) Streuung ↓
- 3) Streuung in Beobachtungsrichtung ↑
- 4) isotrope temperaturabhängige Emission ↑



Strahlungstransportgleichung:

$$\frac{dI(\tau)}{d\tau} = -\frac{N}{V} (C_{\text{abs}} + C_{\text{streu}}) I(\tau) + \frac{NC_{\text{streu}}}{4\pi V} \int_{4\pi} p(\tau, \Omega, \Omega') I(\tau, \Omega') d\Omega' + \frac{N}{V} C_{\text{abs}} I_{\text{schwarz}}(\tau)$$

Lösen der STG mittels 3-Fluss Näherung:

$$\frac{dI(\tau)}{d\tau} = -\frac{N}{V} (C_{\text{abs}} + C_{\text{streu}}) I(\tau) + \frac{NC_{\text{streu}}}{4\pi V} \int_{4\pi} p(\tau, \Omega, \Omega') I(\tau, \Omega') d\Omega' + \frac{N}{V} C_{\text{abs}} I_{\text{schwarz}}(\tau)$$

Lösen der STG mittels 3-Fluss Näherung:

- Betrachtung von Strahlung, die aus 3 verschiedenen Richtungen auf Streuzentrum trifft $\int \rightarrow \sum$

$$\frac{dI(\tau)}{d\tau} = -\frac{N}{V} (C_{\text{abs}} + C_{\text{streu}}) I(\tau) + \frac{NC_{\text{streu}}}{4\pi V} \int_{4\pi} p(\tau, \Omega, \Omega') I(\tau, \Omega') d\Omega' + \frac{N}{V} C_{\text{abs}} I_{\text{schwarz}}(\tau)$$

Lösen der STG mittels 3-Fluss Näherung:

- Betrachtung von Strahlung, die aus 3 verschiedenen Richtungen auf Streuzentrum trifft $\int \rightarrow \sum$
- Isotrope Streuung $p(\tau, \Omega, \Omega') = 1$: \rightarrow Lösen der Gleichung

$$\frac{dI(\tau)}{d\tau} = -\frac{N}{V} (C_{\text{abs}} + C_{\text{streu}}) I(\tau) + \frac{NC_{\text{streu}}}{4\pi V} \int_{4\pi} p(\tau, \Omega, \Omega') I(\tau, \Omega') d\Omega' + \frac{N}{V} C_{\text{abs}} I_{\text{schwarz}}(\tau)$$

Lösen der STG mittels 3-Fluss Näherung:

- Betrachtung von Strahlung, die aus 3 verschiedenen Richtungen auf Streuzentrum trifft $\int \rightarrow \sum$
- Isotrope Streuung $p(\tau, \Omega, \Omega') = 1$: \rightarrow Lösen der Gleichung
- Übergang zur anisotropen Streuung durch Anisotropiefaktor g
 - \rightarrow effektive Albedo ω_0^*
 - \rightarrow effektive optische Dicke τ_0^*

$$\frac{dI(\tau)}{d\tau} = -\frac{N}{V} (C_{\text{abs}} + C_{\text{streu}}) I(\tau) + \frac{NC_{\text{streu}}}{4\pi V} \int_{4\pi} p(\tau, \Omega, \Omega') I(\tau, \Omega') d\Omega' + \frac{N}{V} C_{\text{abs}} I_{\text{schwarz}}(\tau)$$

Ergebnis: $R_{g,h}(\omega_0^*, \tau_0^*), T_{g,h}(\omega_0^*, \tau_0^*)$

Ergebnis: $R_{g,h}(\omega_0^*, \tau_0^*), T_{g,h}(\omega_0^*, \tau_0^*)$

Effektive Albedo

$$\omega_0^* = S^* / E^*$$

Effektive optische Dicke

$$\tau_0^* = E^* \cdot d$$

Effektiver Extinktionskoeffizient

$$E^* = A + S^*$$

Ergebnis: $R_{g,h}(\omega_0^*, \tau_0^*), T_{g,h}(\omega_0^*, \tau_0^*)$

Effektive Albedo

$$\omega_0^* = S^* / E^*$$

Effektive optische Dicke

$$\tau_0^* = E^* \cdot d$$

Effektiver Extinktionskoeffizient

$$E^* = A + S^*$$

→ Berechnung des Extinktionskoeffizienten durch Messung des gerichtethemisphärischen Transmissions- und Reflexionsgrads



Streutheorie:

Vorgabe materialspezifischer Parameter
(Partikelgrößenverteilung, kompl. Brechungsindex)

Strahlungstransportgleichung:

Messung von Refl.- und Transmissionsgrad
(3-Fluss-Näherung)

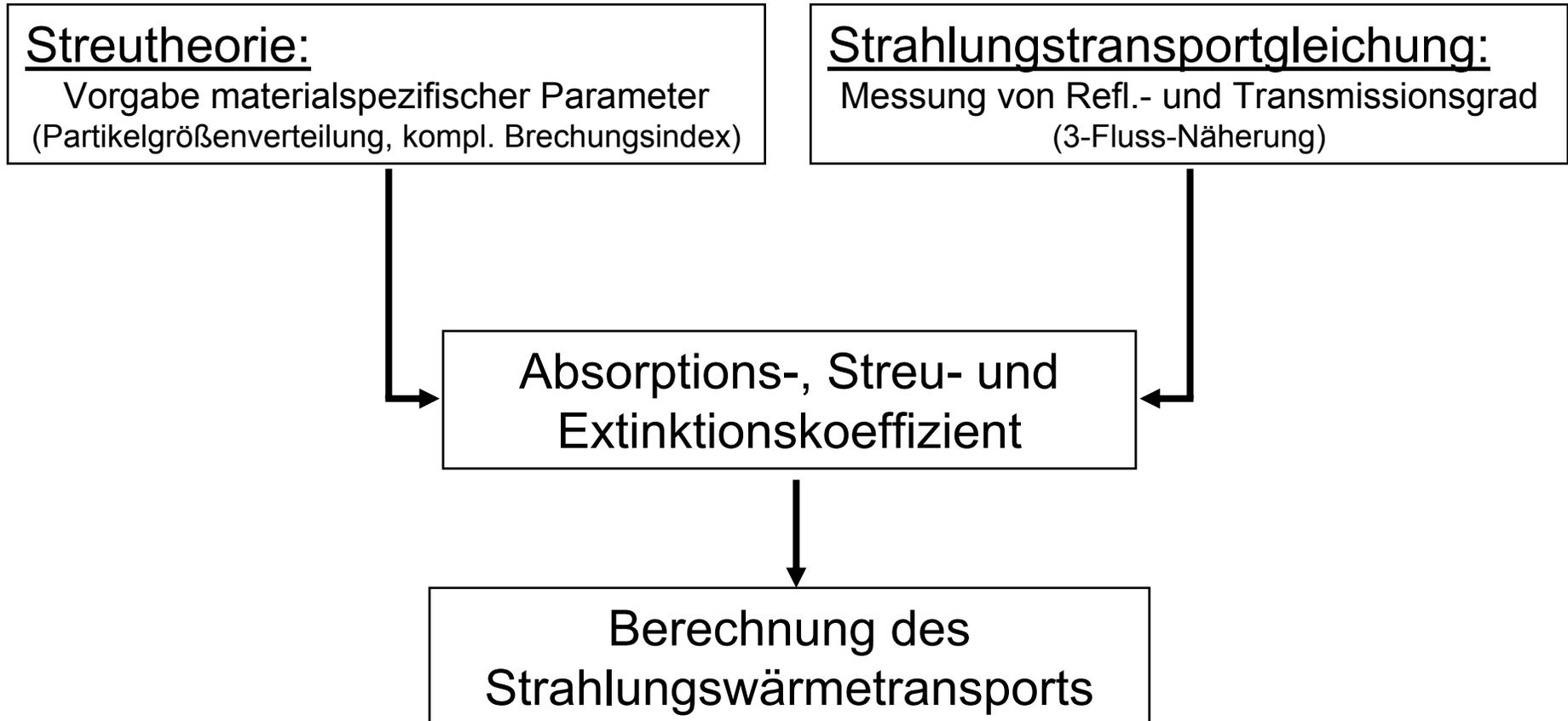
Streutheorie:

Vorgabe materialspezifischer Parameter
(Partikelgrößenverteilung, kompl. Brechungsindex)

Strahlungstransportgleichung:

Messung von Refl.- und Transmissionsgrad
(3-Fluss-Näherung)

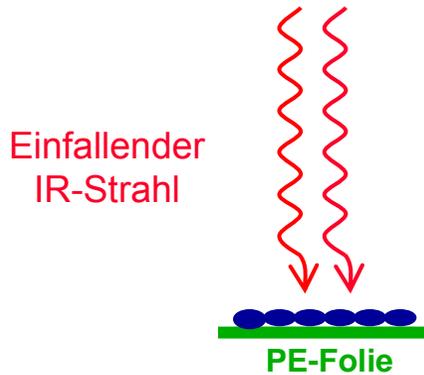
Absorptions-, Streu- und
Extinktionskoeffizient



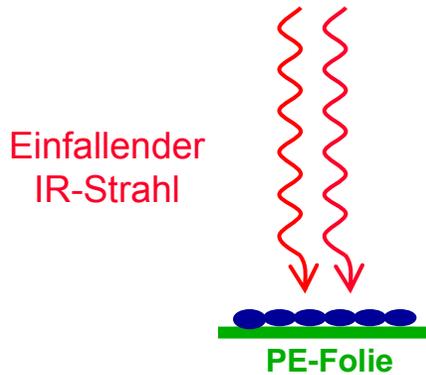
Probenpräparation: IR-Trübungsmittel



ZAE BAYERN

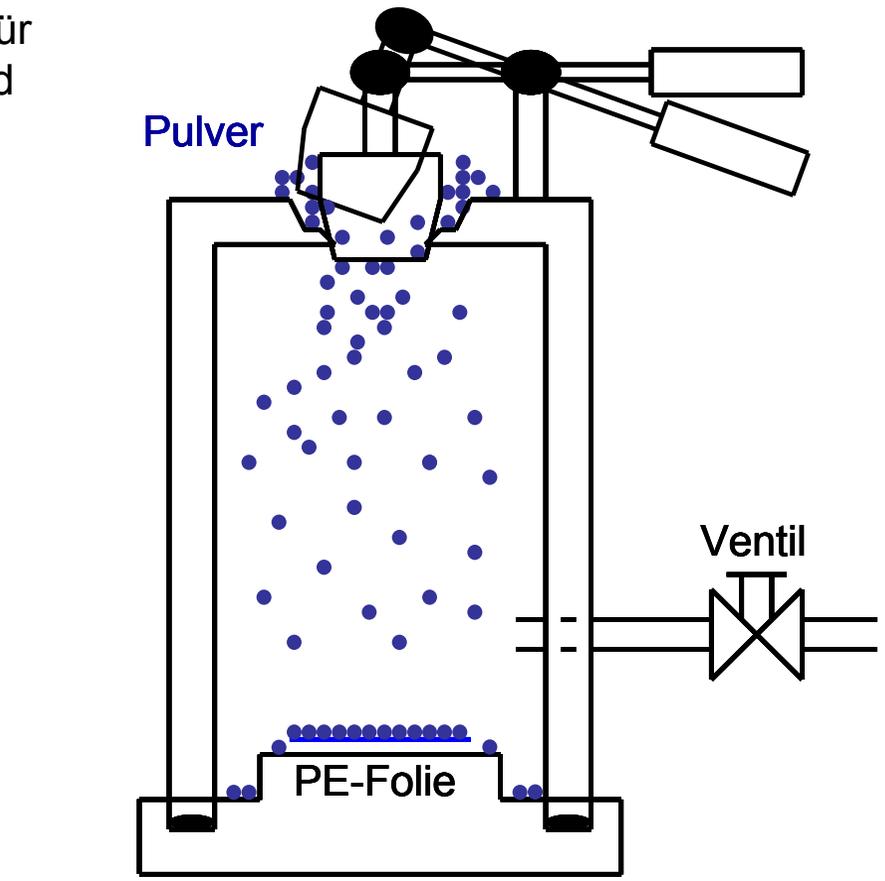


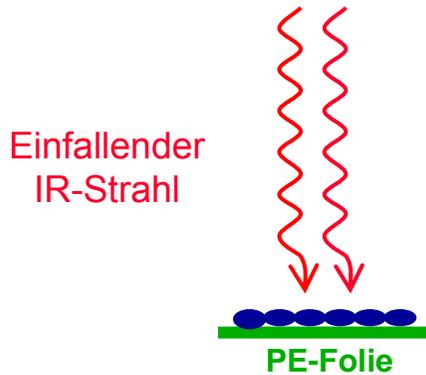
- gleichmäßiges Beschichten eines Trägers (PE-Folie, KBr-Plättchen)
- geeignete Massenbelegung für benötigten Transmissionsgrad



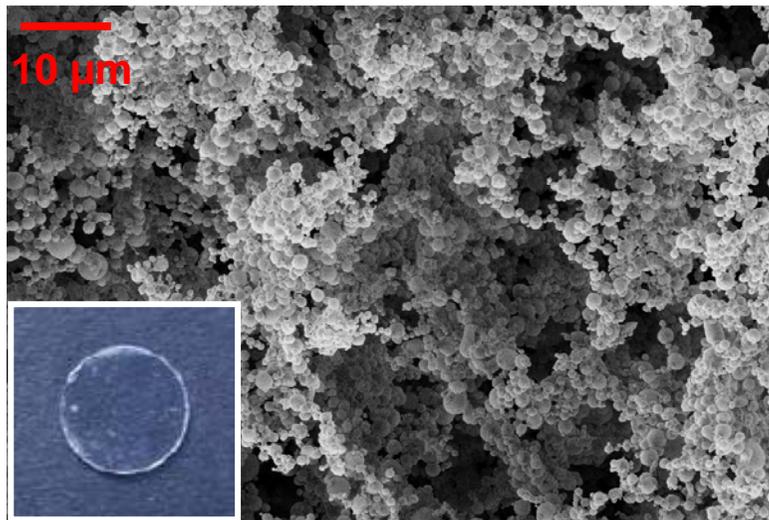
- gleichmäßiges Beschichten eines Trägers (PE-Folie, KBr-Plättchen)
- geeignete Massenbelegung für benötigten Transmissionsgrad

Vakuumdиспергатор

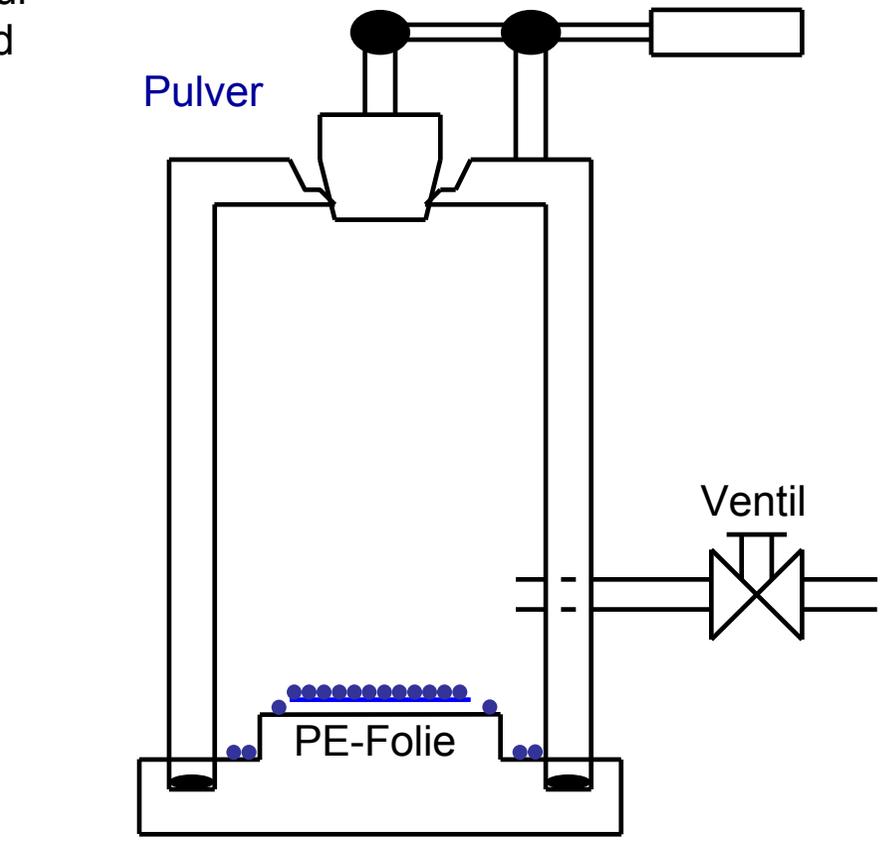




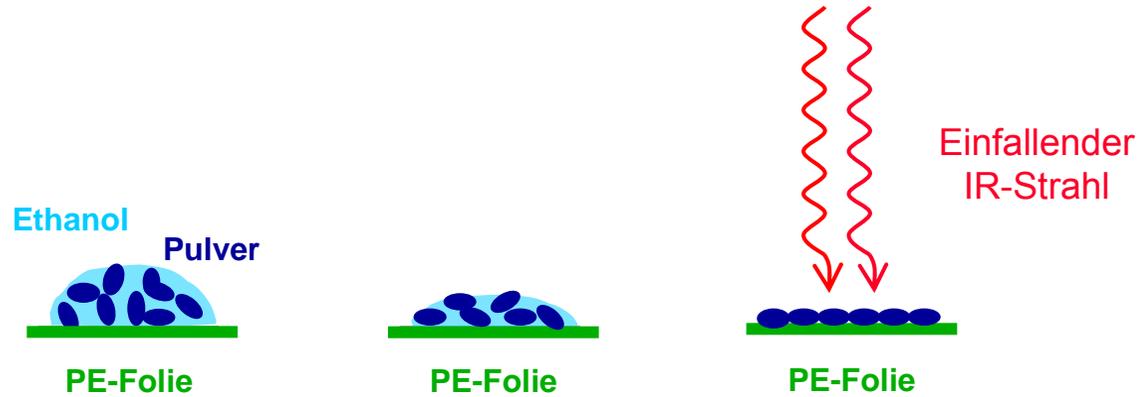
- gleichmäßiges Beschichten eines Trägers (PE-Folie, KBr-Plättchen)
- geeignete Massenbelegung für benötigten Transmissionsgrad



Vakuumdиспергатор

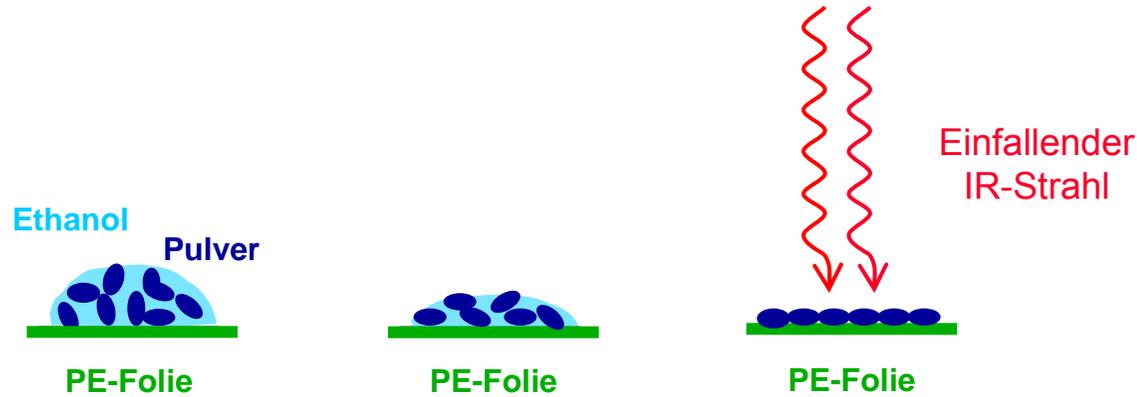


Flüssigdispergierung in Ethanol



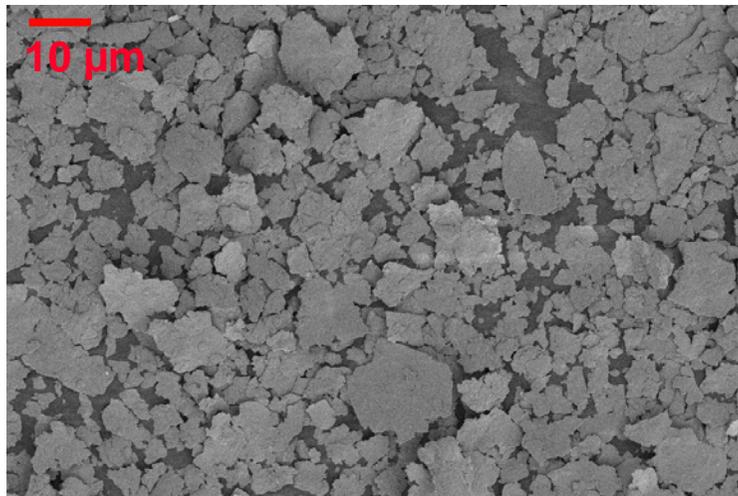
- geeignete Massenbelegung für benötigten Transmissionsgrad
- horizontale, gleichmäßige Ausrichtung nicht-sphärischer Partikel (z.B. Plättchen)

Flüssigdispergierung in Ethanol

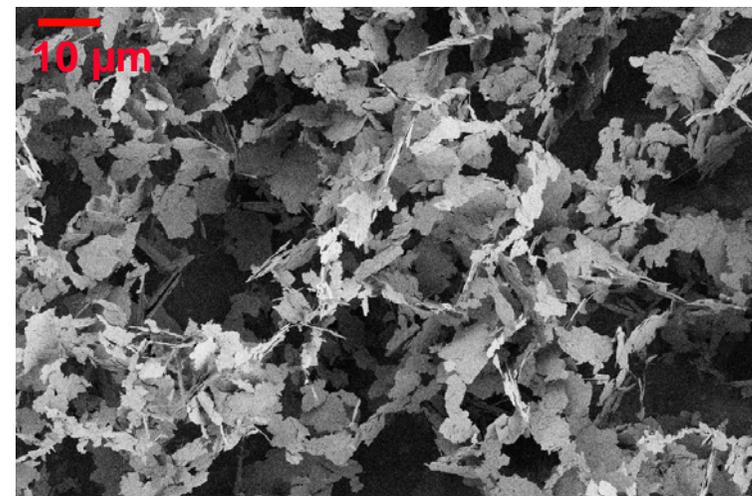


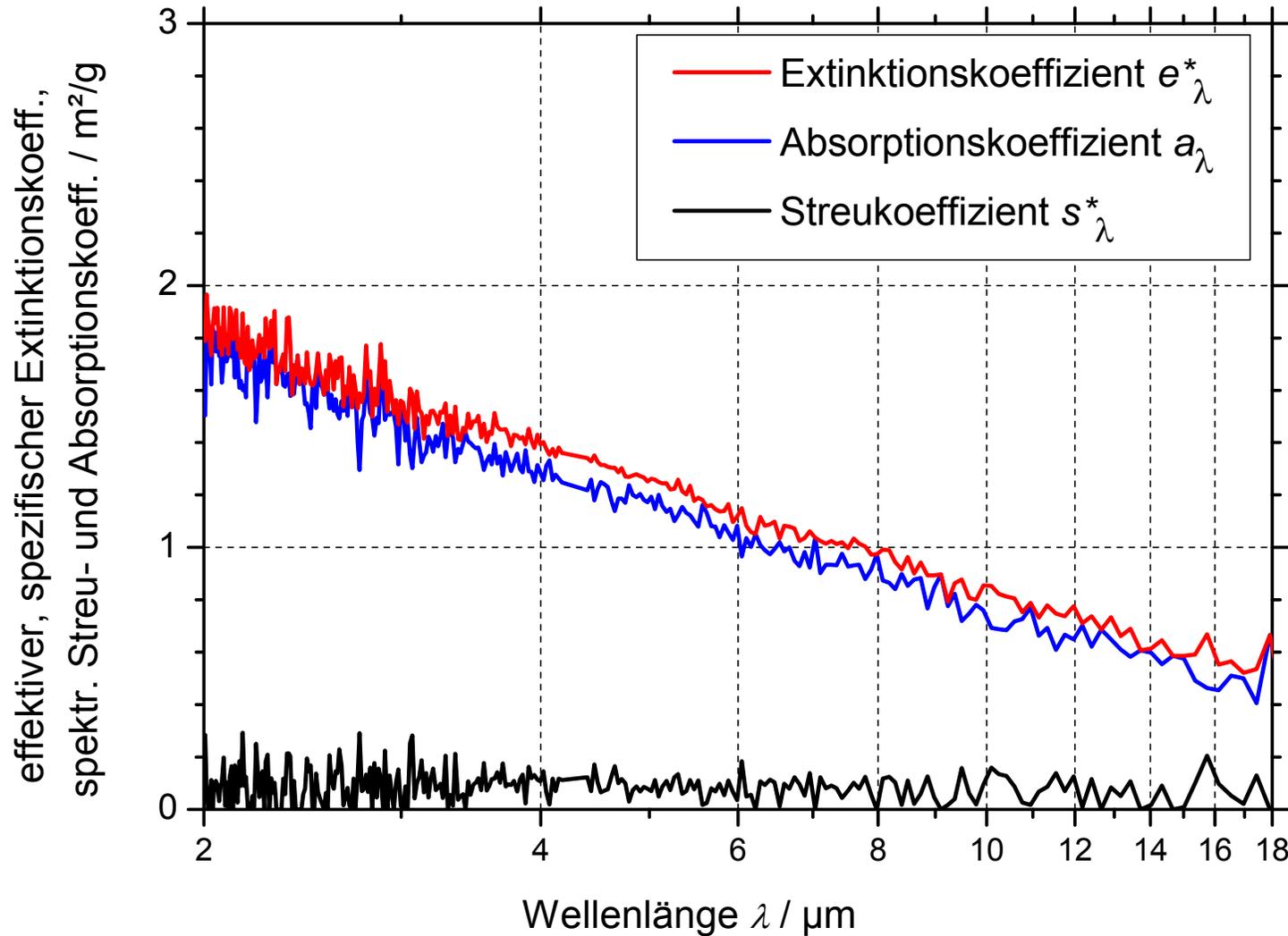
- geeignete Massenbelegung für benötigten Transmissionsgrad
- horizontale, gleichmäßige Ausrichtung nicht-sphärischer Partikel (z.B. Plättchen)

Flüssigdispergierung



Vakuumdispergierung

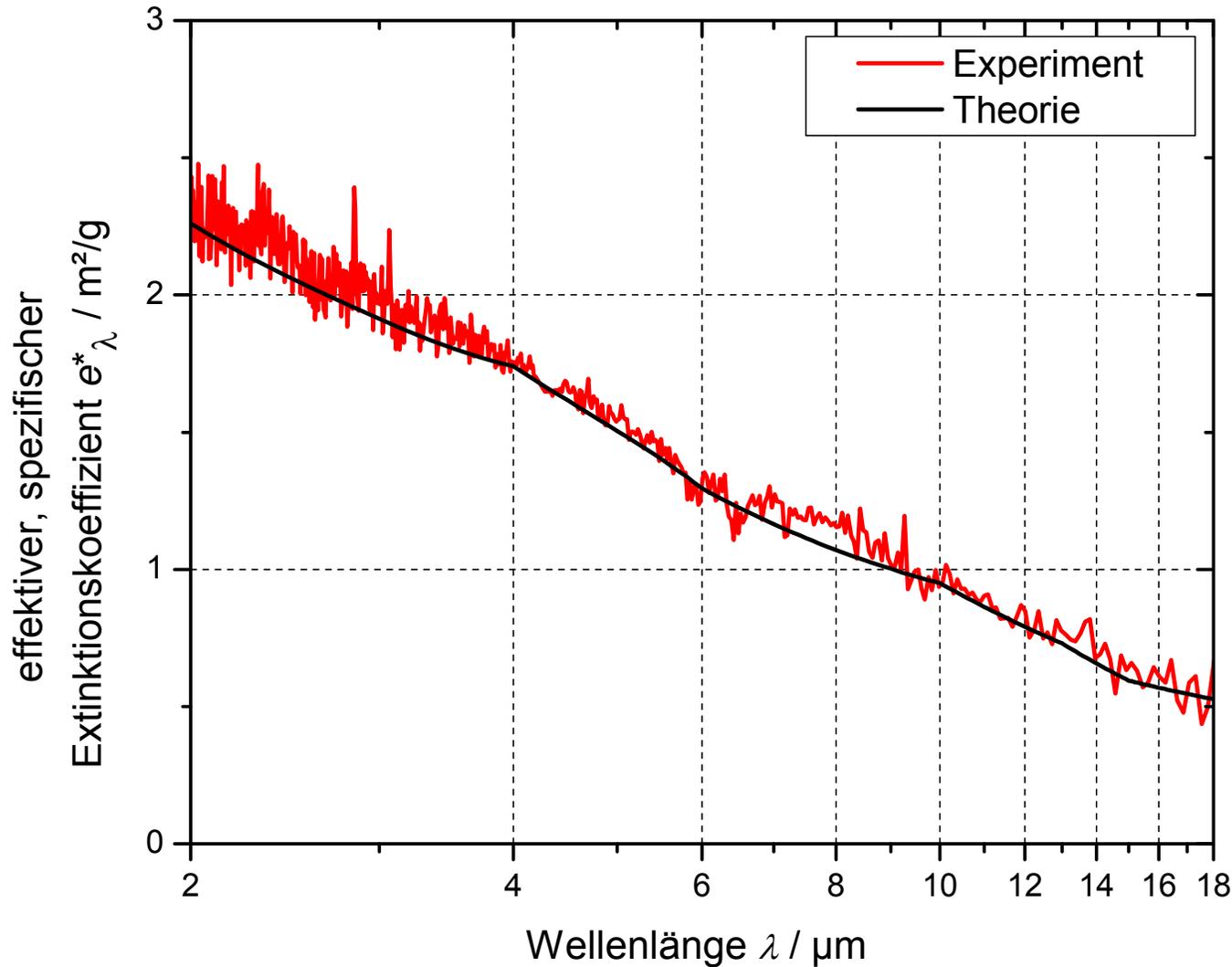




Furnace- Ruß:

$d_{50} = 14 \text{ nm}$

vorwiegend
Absorption

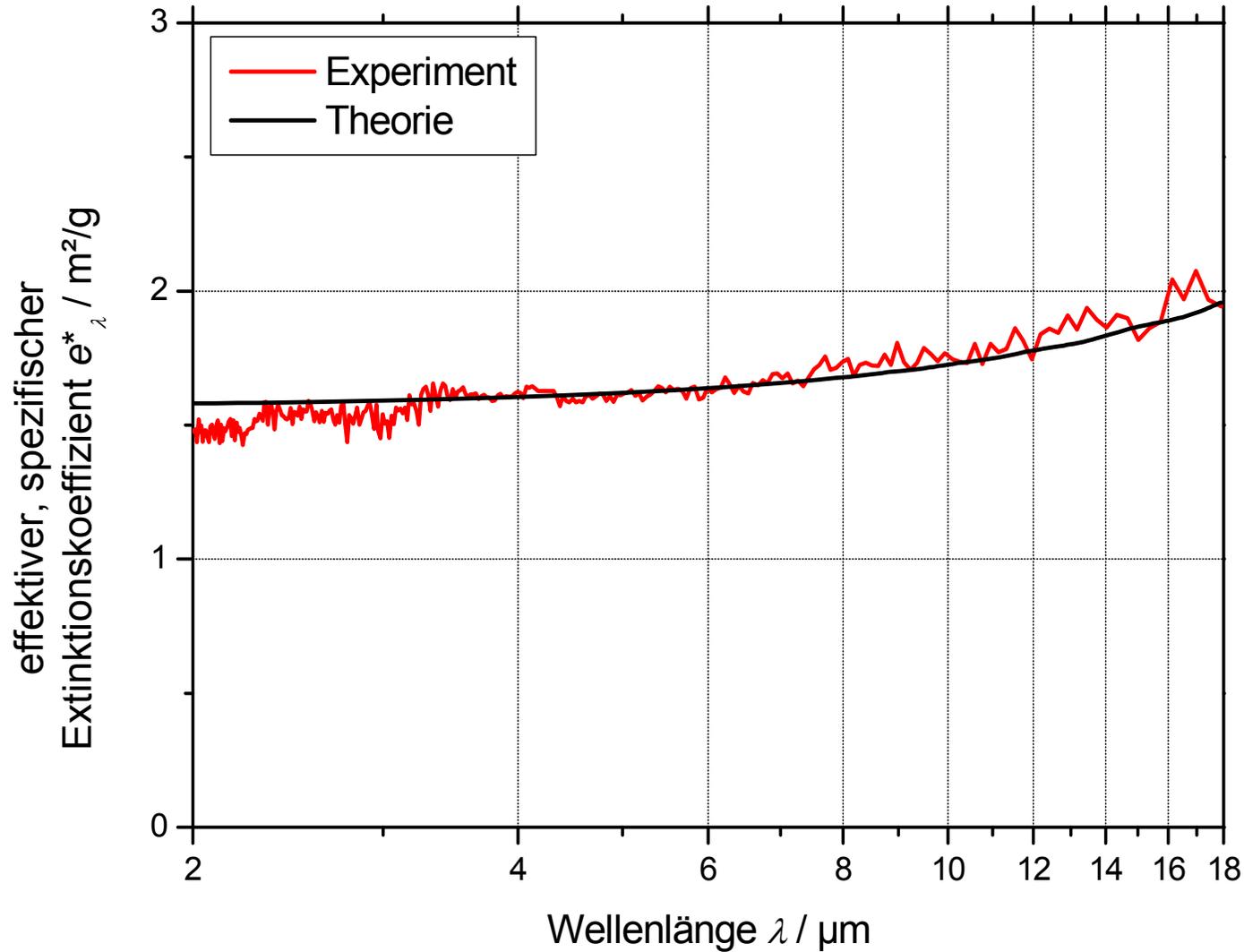


Flamm- Ruß:

$d_{50} = 95 \text{ nm}$

vorwiegend
Absorption

Ergebnisse – Metalle



Al- Plättchen:

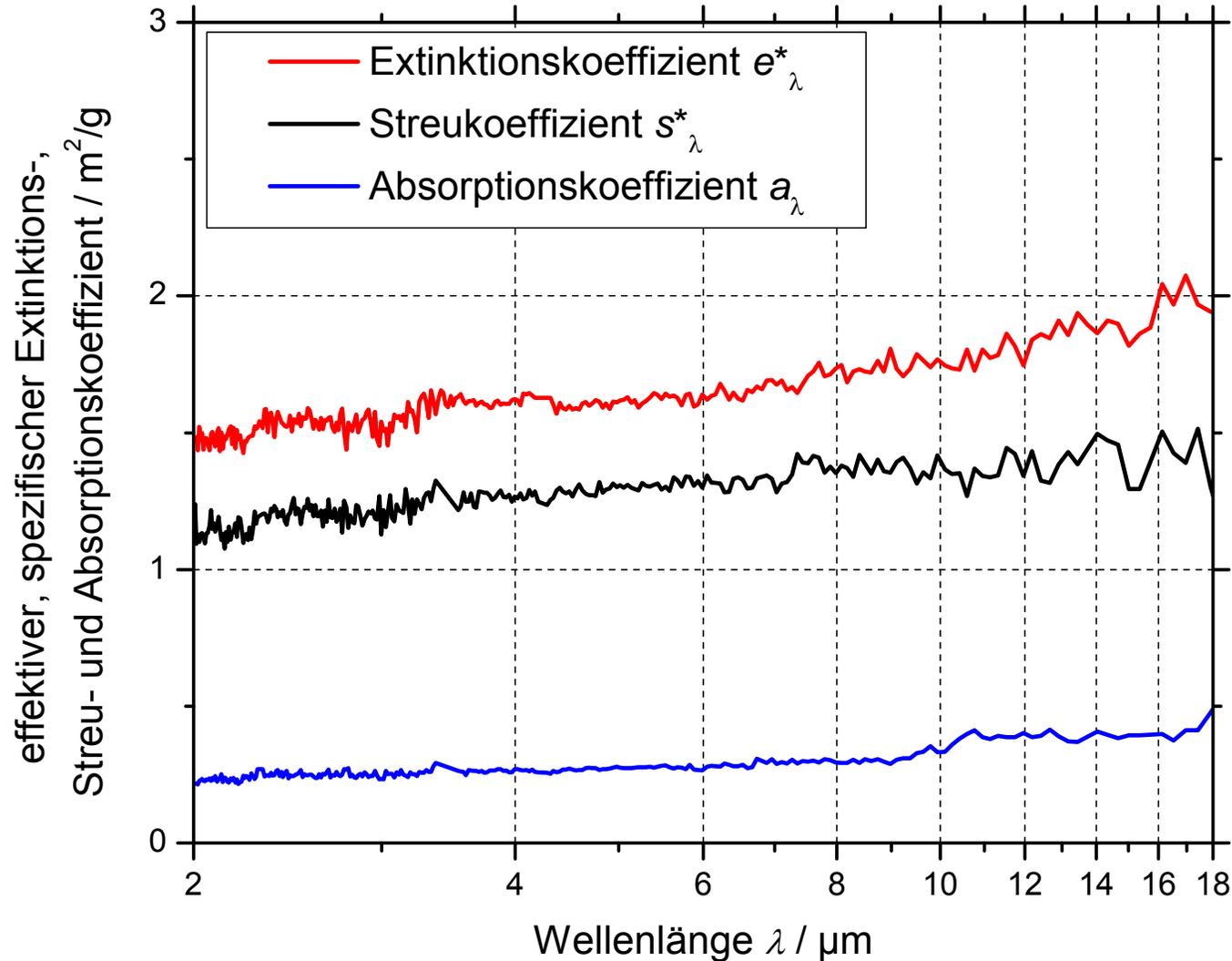
$$d_{50} = 10 \mu\text{m}$$

vorwiegend
Streuung

Ergebnisse – Metalle



ZAE BAYERN



Al- Plättchen:
(Vakuumdispersiert)

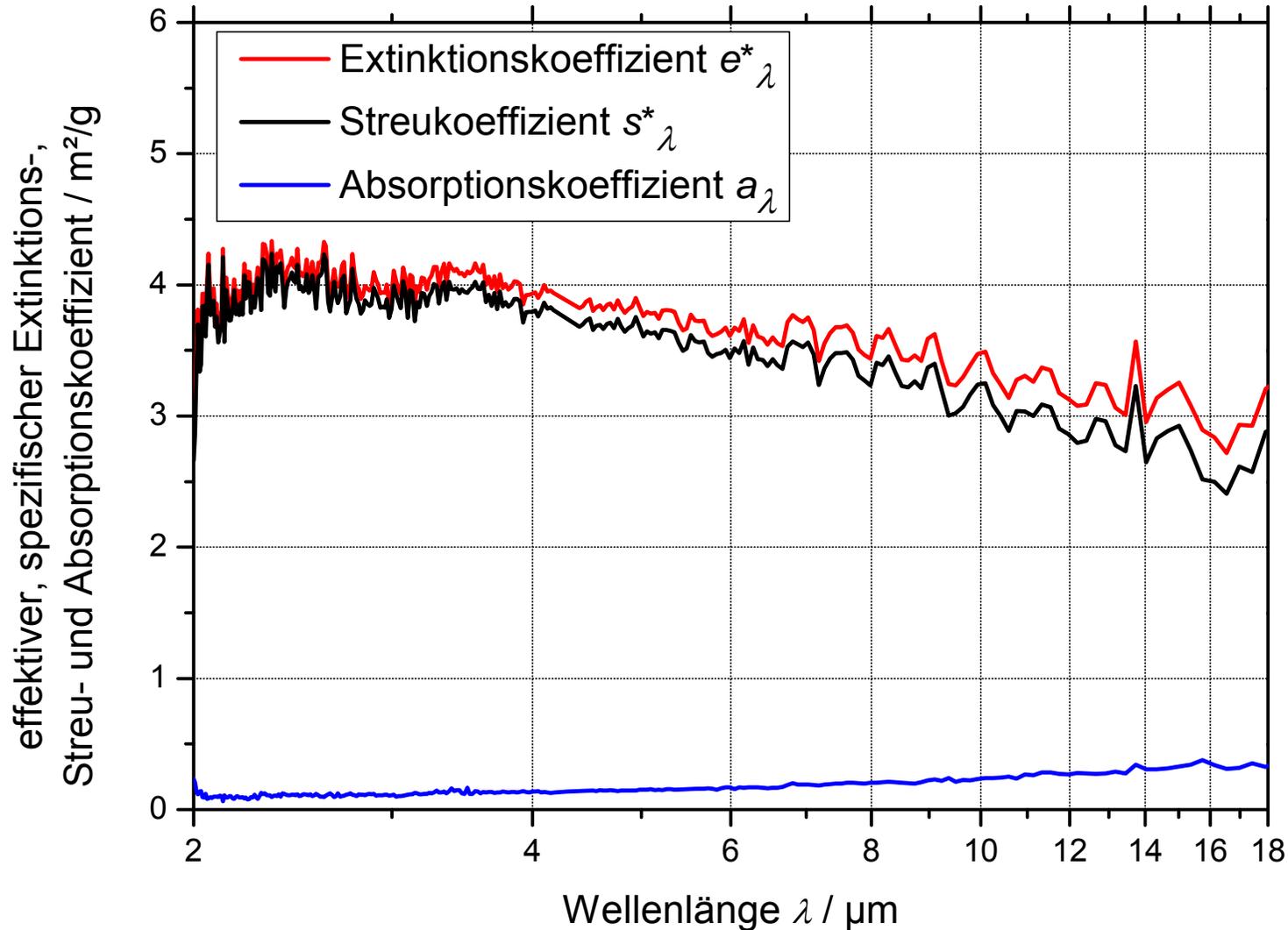
$d_{50} = 10 \mu\text{m}$

vorwiegend
Streuung

Ergebnisse – Metalle



ZAE BAYERN



Al- Plättchen:
(Ethanoldispersiert)

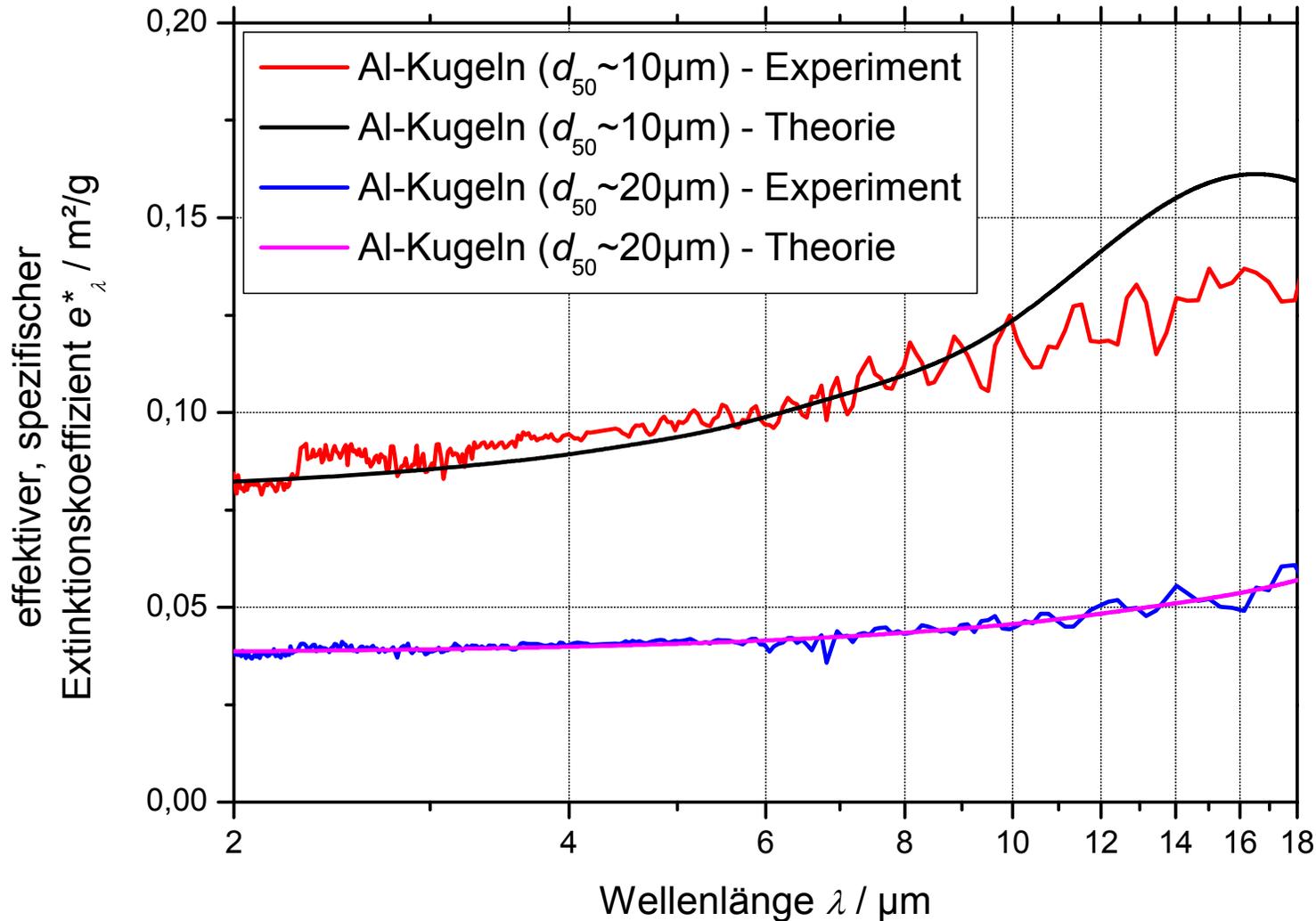
$d_{50} = 10 \mu\text{m}$

vorwiegend
Streuung

Ergebnisse – Metalle



ZAE BAYERN



Al- Kugeln:

$d_{50} = 10 \mu\text{m}$

$d_{50} = 20 \mu\text{m}$

vorwiegend
Streuung

- Fazit:**
- Theoretische Modellierung des Extinktionskoeffizienten aus materialspezifischen Parametern
 - Berechnung des Extinktionskoeffizienten aus der Messung von Reflexions- und Transmissionsgrad

Fazit:

- Theoretische Modellierung des Extinktionskoeffizienten aus materialspezifischen Parametern
- Berechnung des Extinktionskoeffizienten aus der Messung von Reflexions- und Transmissionsgrad

Ausblick:

- Verbesserung der Probenpräparation (Dispergierung)
- Optimierung der Simulationsalgorithmen
 - T-Matrix-Methode als Erweiterung der Mie-Theorie für beliebige Teilchenformen
 - Effektive-Medien-Theorie als Erweiterung für absorbierende Partikelumgebung

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

rydzek@zae.uni-wuerzburg.de