

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V.

Vorhersage der effektiven Wärmeleitfähigkeit in mehrphasigen Systemen

D. Gerstenlauer, S. Vidi, F. Hemberger, HP. Ebert
Vortrag – AK Thermophysik – 25.04.2016

MIT SONNE UND VERSTAND.



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung

Motivation

- Vorhersage der Eigenschaften wie Struktur und Wärmeleitfähigkeit von Materialsystemen
- Optimierung der Wärmeleitfähigkeit von Materialsystemen in Bezug auf
 - „Tuning“ der Wärmeleitfähigkeit
 - Ressourceneinsatz

Industriewunsch:

„Es wäre schön, wenn man ein Excel Sheet hätte, in dem man mit Schieberegler die Größe und Verteilung von Inhomogenitäten einstellen könnte und dann kommt am Schluss die Wärmeleitfähigkeit raus“

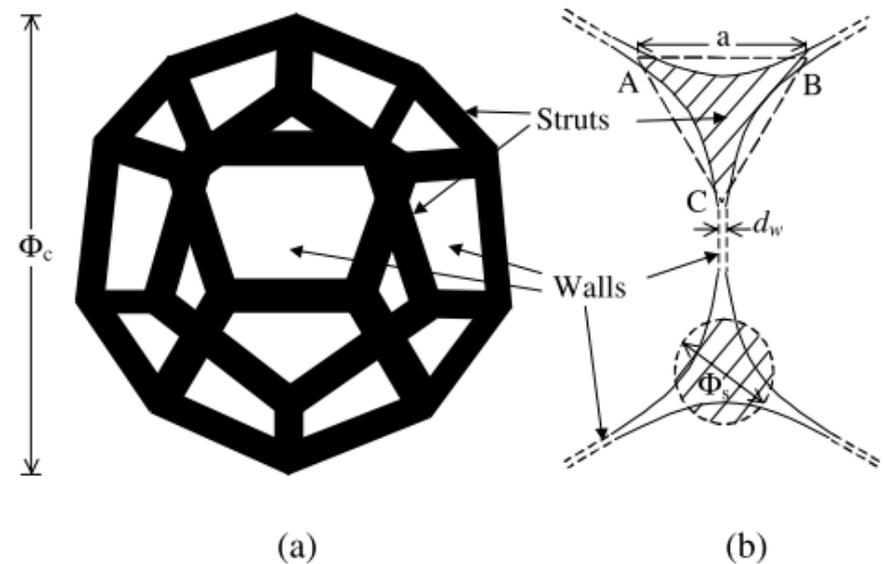
- Inhomogenitäten
 - Simulation

- Alternative Algorithmen
 - Simulation
 - Experiment

Inhomogenitäten

- Inhomogenes Materialsystem
 - Keine Homogenitätsannahme möglich
 - Keine Einheitszelle festlegbar

- Beispiel Schaum:
Dodecahedron als
Einheitszelle



3 Inhomogenitäten

Simulationsparameter:

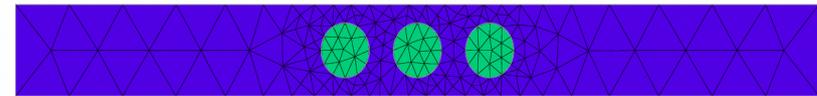
Schaum

$$(\lambda_{\text{foam}} = 0.040 \text{ W/m/K})$$

mit Inhomogenitäten

$$(\lambda_{\text{inhom}} = 0.100 \text{ W/m/K})$$

in GHP



3 Inhomogenitäten

Simulationsparameter:

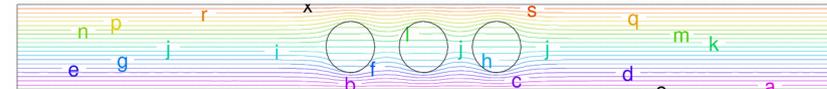
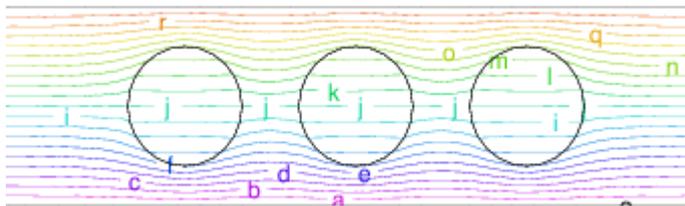
Schaum

$$(\lambda_{\text{foam}} = 0.040 \text{ W/m/K})$$

mit Inhomogenitäten

$$(\lambda_{\text{inhom}} = 0.100 \text{ W/m/K})$$

in GHP



3 Inhomogenitäten

Simulationsparameter:

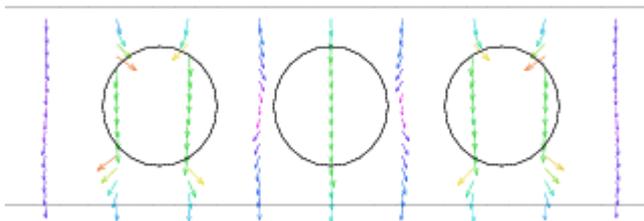
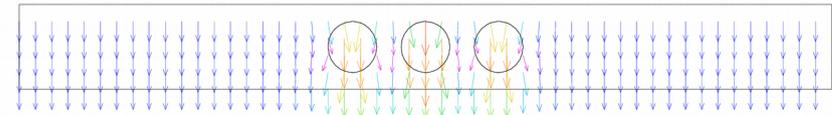
Schaum

($\lambda_{\text{foam}} = 0.040 \text{ W/m/K}$)

mit Inhomogenitäten

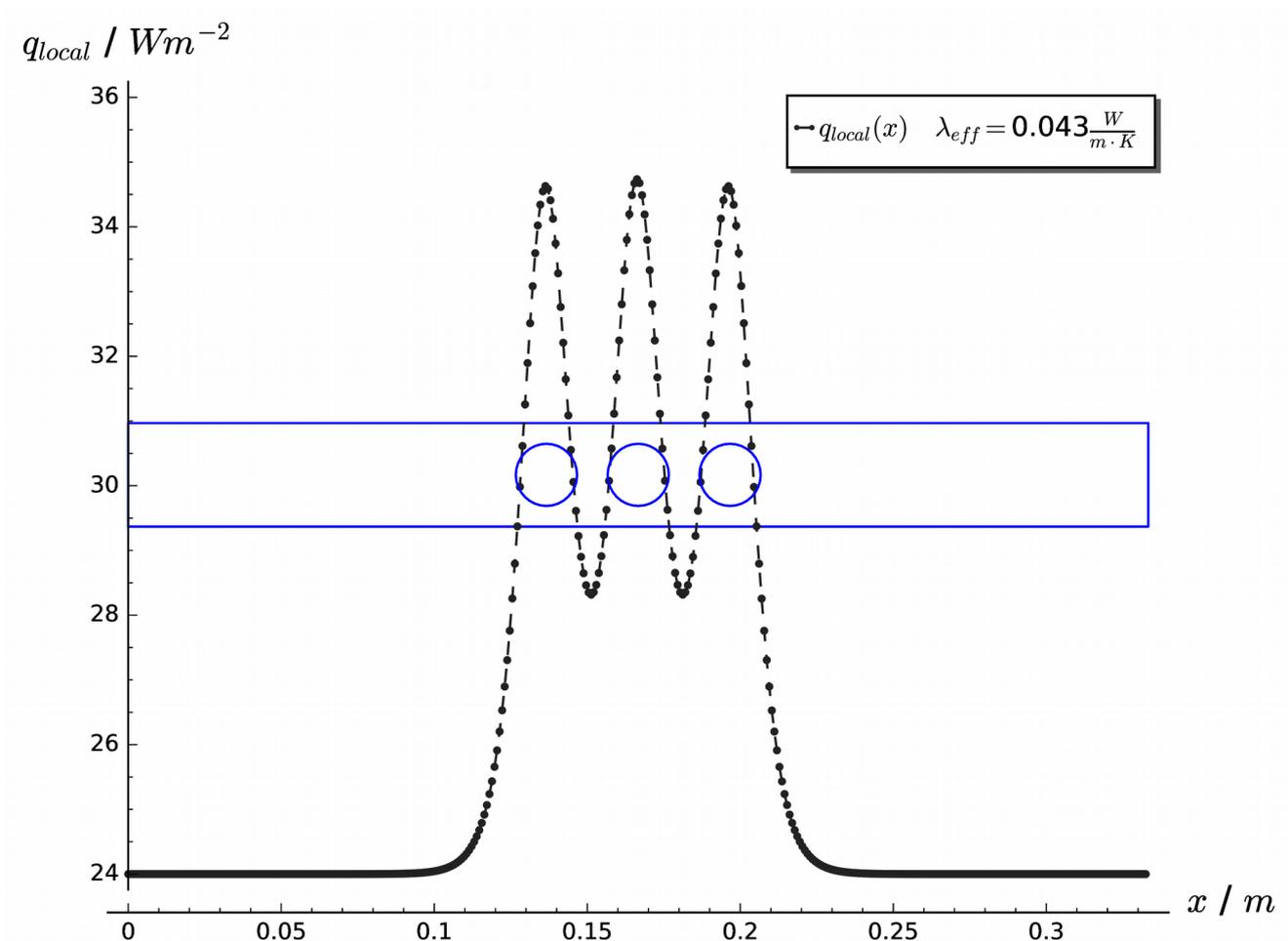
($\lambda_{\text{inhom}} = 0.100 \text{ W/m/K}$)

in GHP

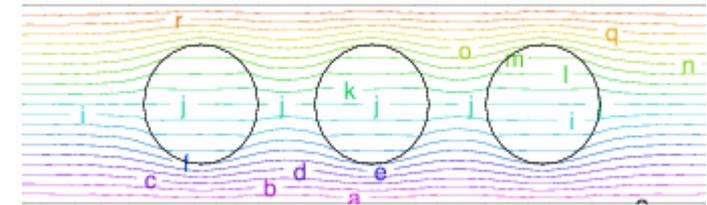
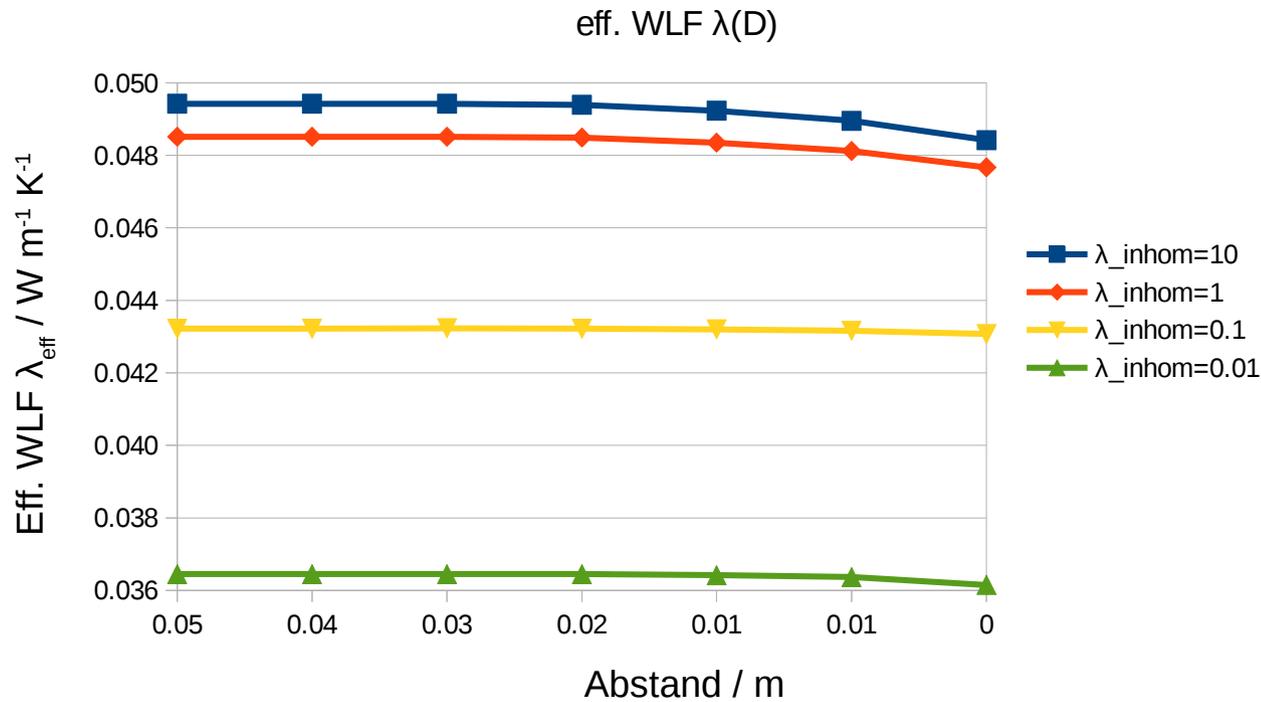


3 Inhomogenitäten

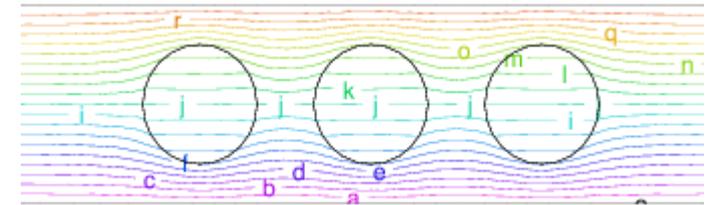
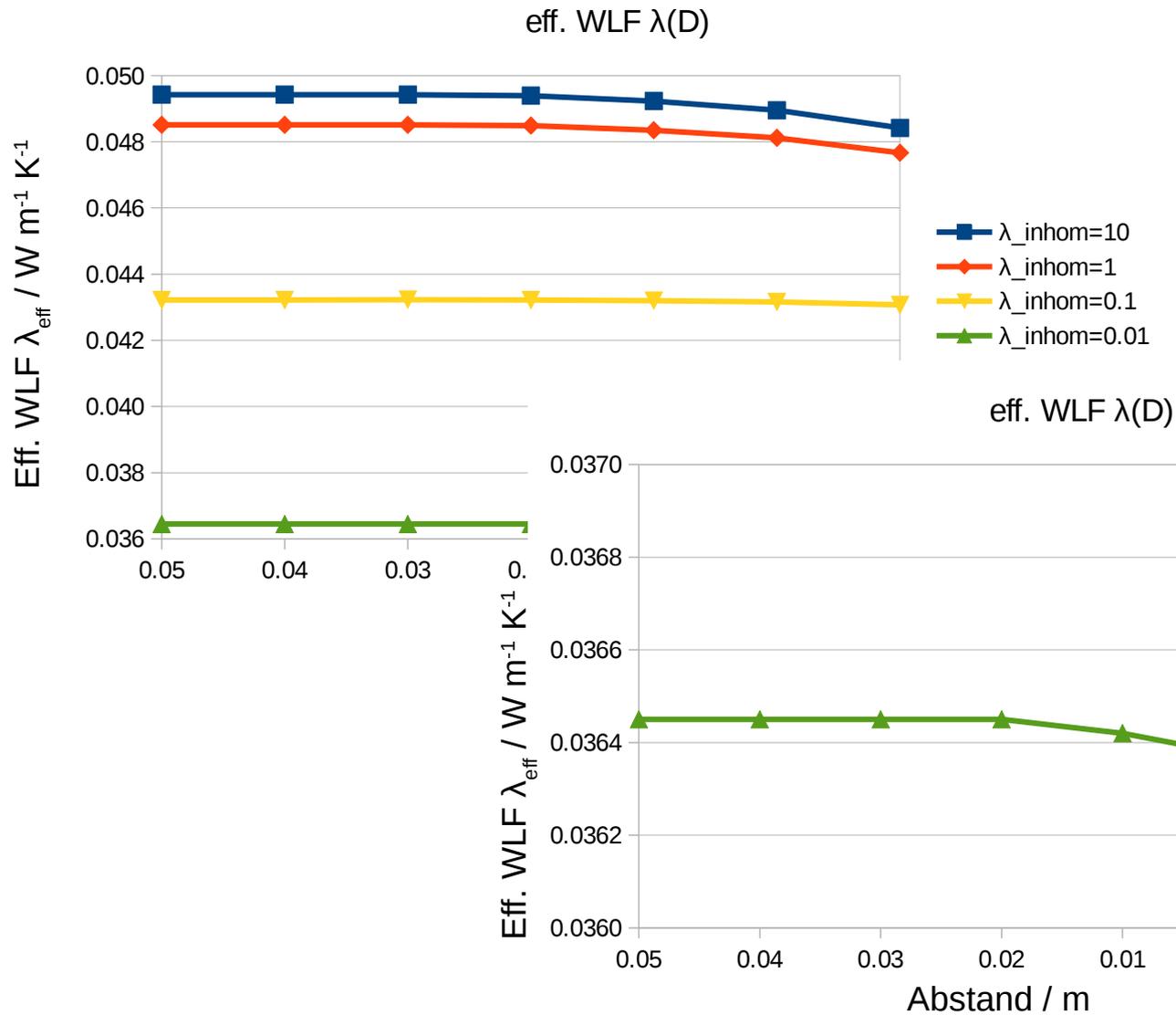
Simulation des (lokalen) Wärmestroms & Verhalten λ_{eff}



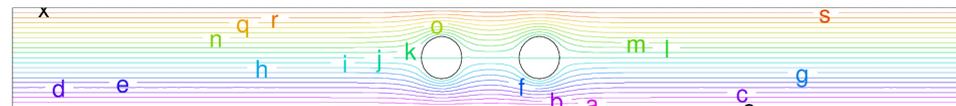
3 Inhomogenitäten



3 Inhomogenitäten



2 Inhomogenitäten

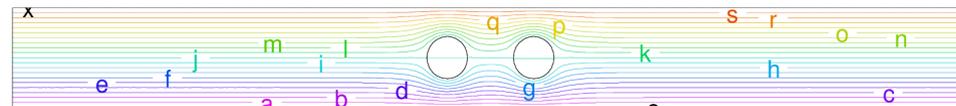


2 Inhomogenitäten

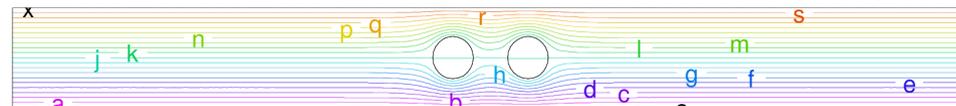


ZAE BAYERN

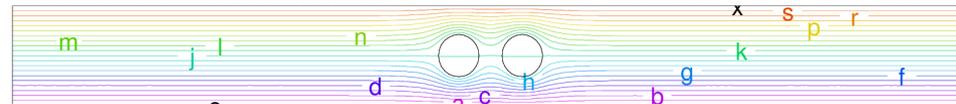
Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung



2 Inhomogenitäten



2 Inhomogenitäten

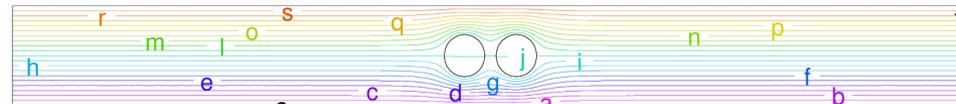


2 Inhomogenitäten



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung

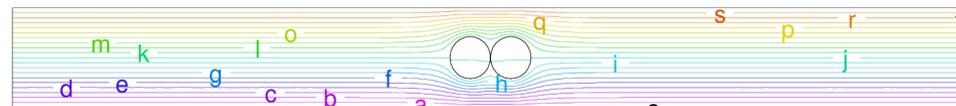


2 Inhomogenitäten

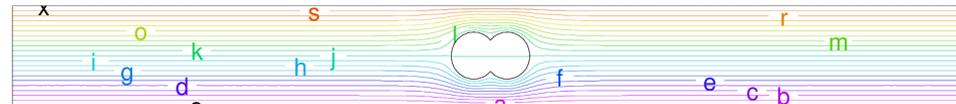


ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung



2 Inhomogenitäten

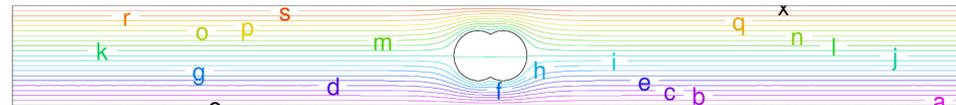


2 Inhomogenitäten

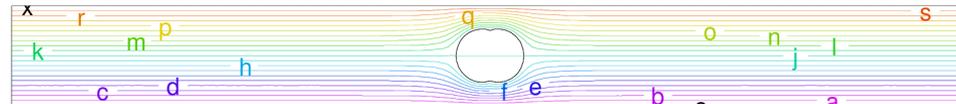


ZAE BAYERN

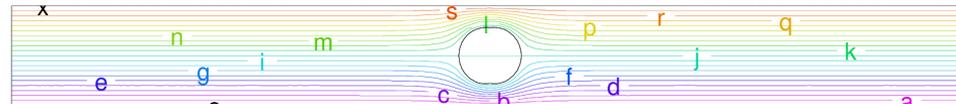
Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung



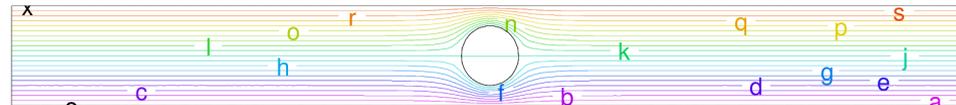
2 Inhomogenitäten



2 Inhomogenitäten

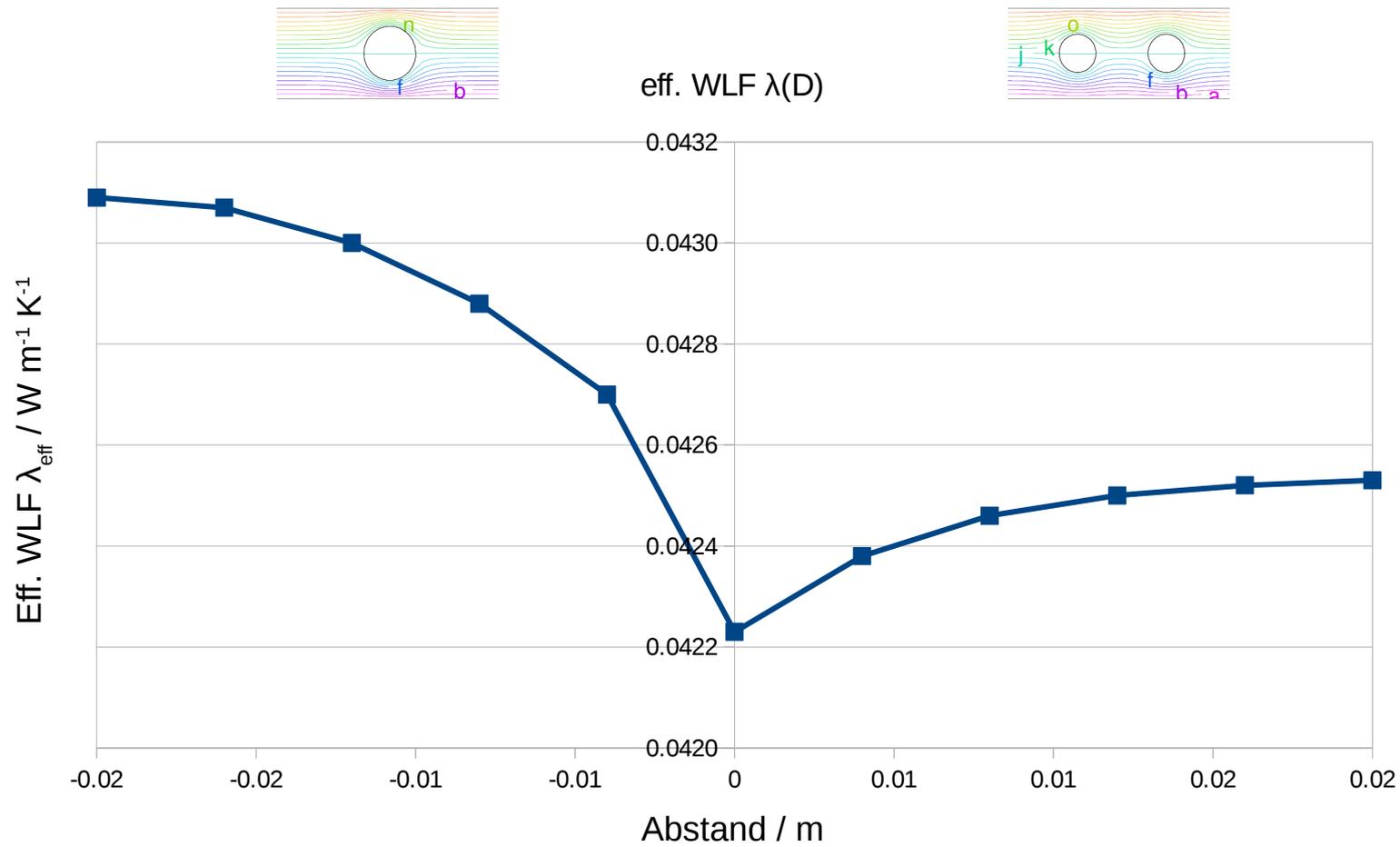


2 Inhomogenitäten



2 Inhomogenitäten

$$\lambda_{\text{foam}} = 0.040 \text{ W/m/K}; \lambda_{\text{inhom}} = 20 \text{ W/m/K}$$



Inhomogenitäten

- Relevante Parameter identifizieren wie z.B.
 - Verteilung und Form der Phasen
 - Kritische (Kopplungs)Längen
- (fkt.) Zusammenhänge formulieren
- Experimentell prüfen

Alternative Algorithmen

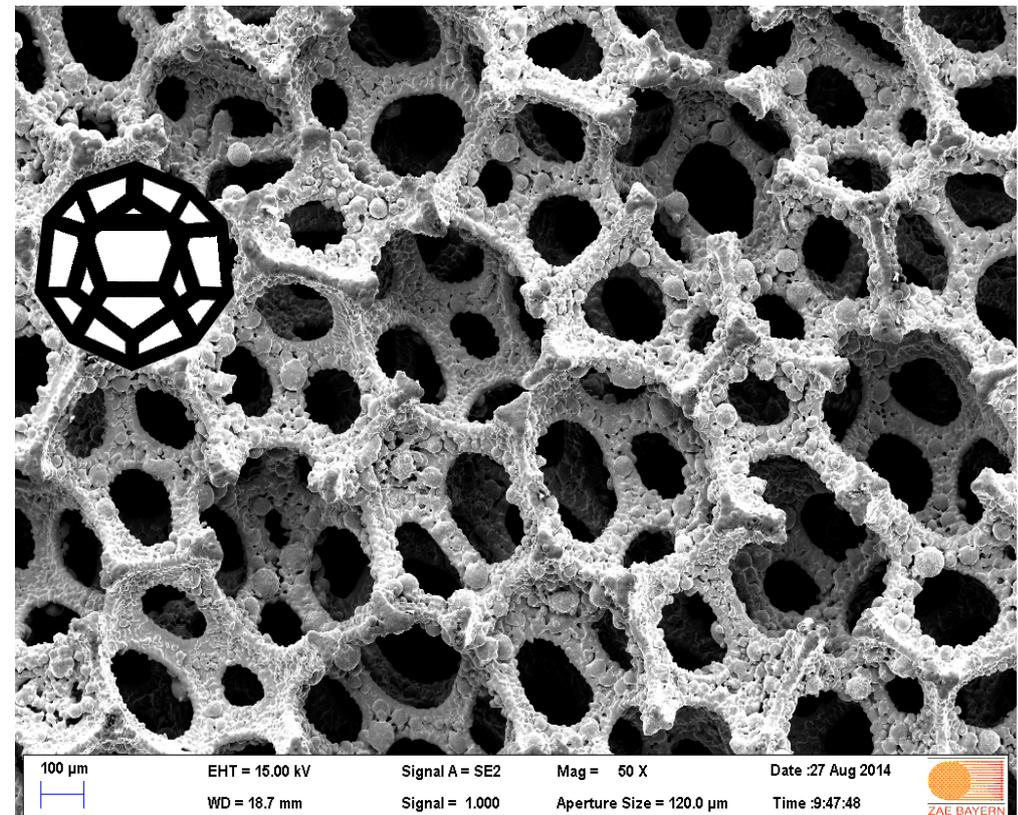
You don't understand anything until you learn it more than one way - Marvin Minsky

→ Alternative Berechnung λ_{eff} in Mehrphasensystemen

Alternative Algorithmen

Einfache, schnelle Näherung der effektiven
Gesamtwärmeleitfähigkeit λ_{eff}

Alternative zu DGL-Lösern (inkl. Randbedingungen)



Alternative Algorithmen

- Schaumparameter
 - Wärmeleitfähigkeit der „bulk“-Materialien λ_i
 - Mittlerer Zelldurchmesser Φ , Porosität δ
- Diskretisierung des Materialsystems und Festlegung Wärmeleitfähigkeiten der einzelnen Elemente
- Addition thermischer Widerstände mit vorher festgelegten Regeln

Alternative Algorithmen

- Fourierscher Erfahrungssatz

$$\vec{q} = \lambda \nabla T$$

$$\rightarrow Q = \frac{-\lambda A}{dx} \times dT \Leftrightarrow I = \frac{1}{R} \times U$$

- Addition thermischer Widerstände in Reihe ($a=1$) oder parallel ($a=-1$)

$$R_{tot} = \left(\sum_i R_i^a \right)^{1/a}$$

Alternative Algorithmen

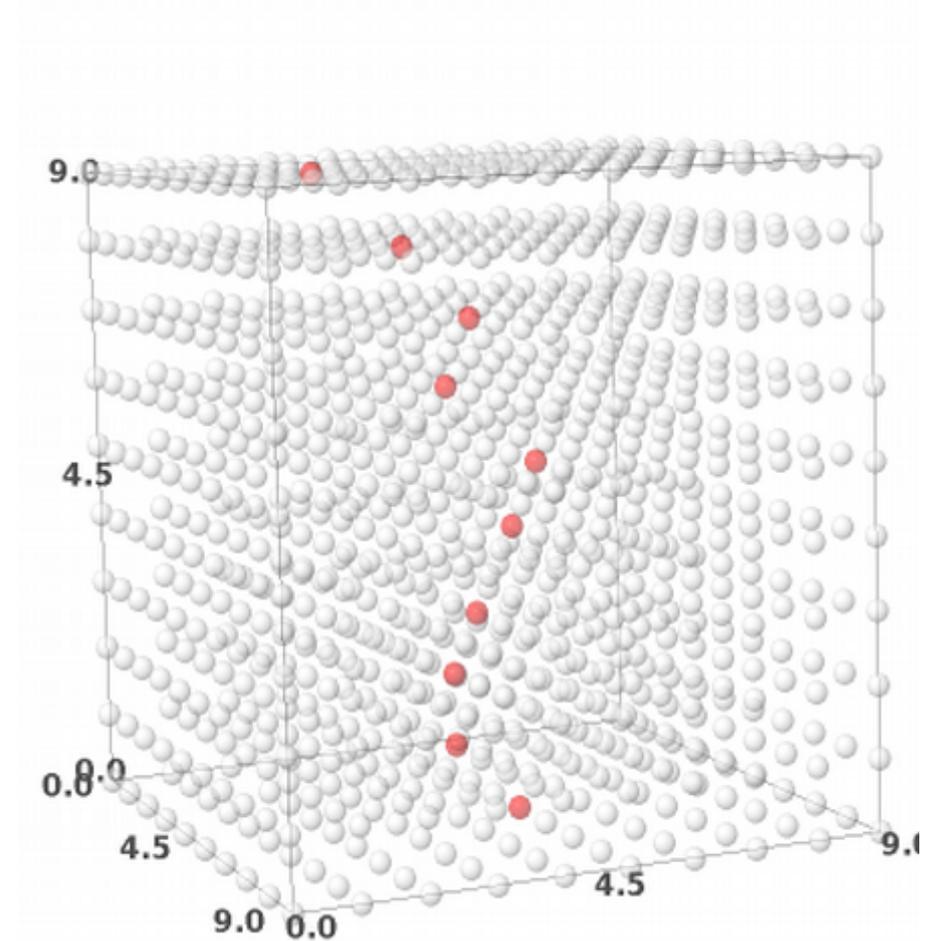


ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung

Pathfinder:

Definition von Regeln,
wie thermische
Widerstände aufaddiert
werden z.B. kürzester
Pfad, zufälliger Pfad, ...



Alternative Algorithmen

Metropolis:

- Wähle zufällige Position
- Prüfe Energiedifferenz dE :
 - Wenn $dE \leq 0$: nehme neue Position an
 - Wenn $dE > 0$, ziehe Zufallszahl p aus $[0,1]$:
 - Wenn $p < \exp(-dE/kT)$: nehme neue Position an
 - Sonst: wähle neue zufällige Position
- Ersetze „Energieparameter“ durch $\frac{R_c}{R_n}$

Alternative Algorithmen

Dijkstra:

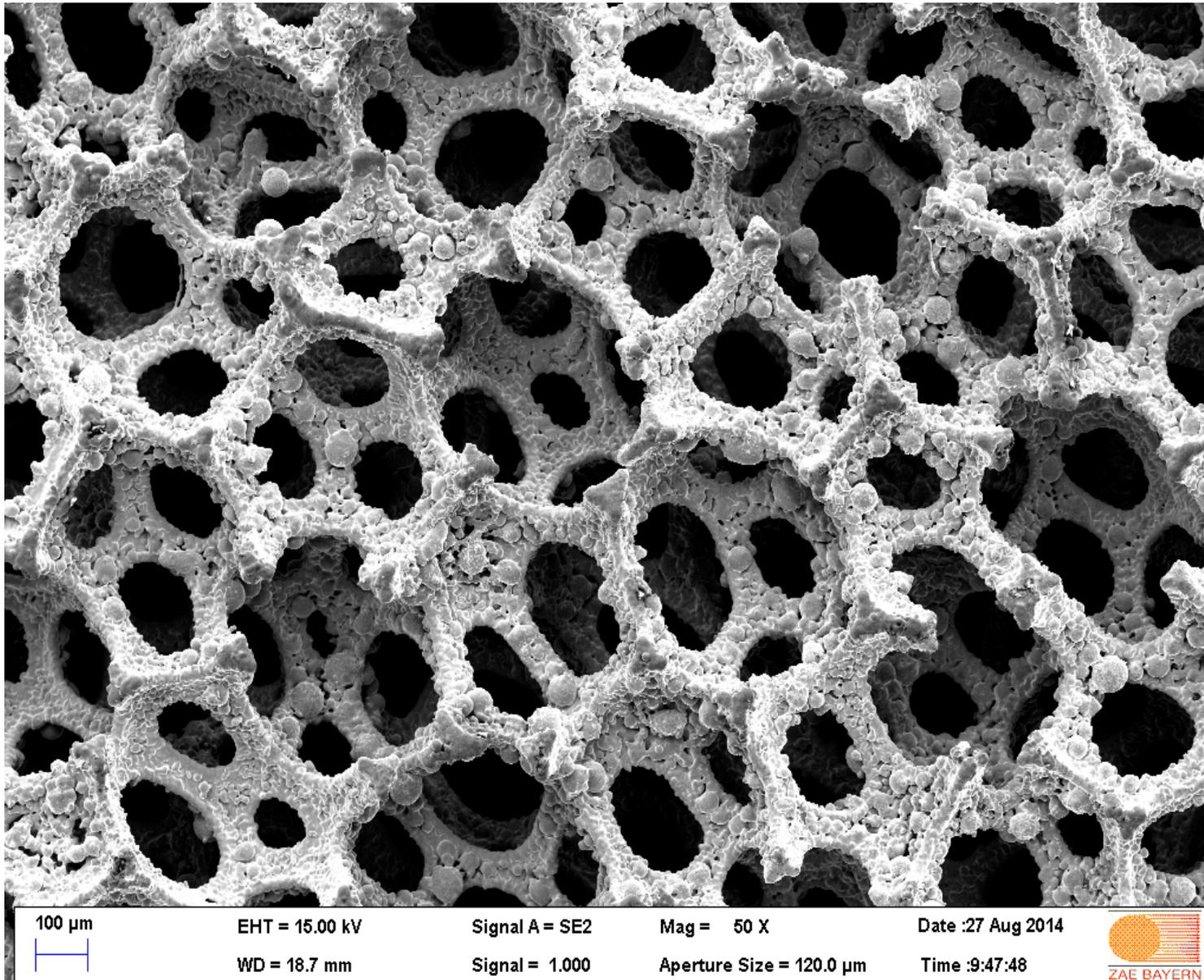
- Finde die kürzeste Entfernung zwischen zwei Knoten innerhalb eines Graphen mit positiven Kantengewichten (z.B. Navigation)
- Hier: Finde den „thermisch kürzesten“ Pfad

Metallschaum



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung



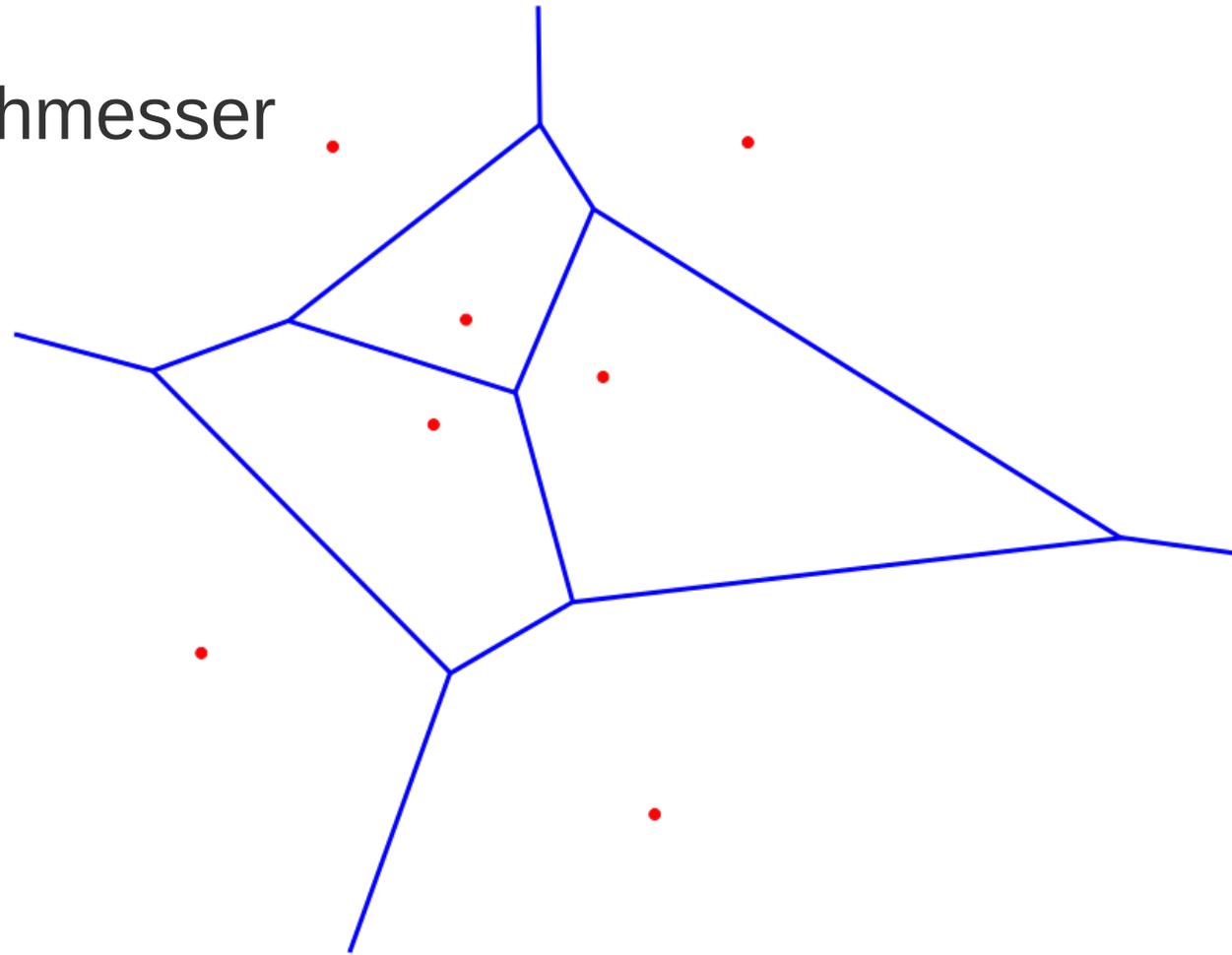
Metallschaum

- NiCrAl Schaum
 - Porosität: 0.87
 - Mittlerer Zelldurchmesser: 450 μm
 - λ_{NiCrAl} : 11.00 W/m/K
 - $\lambda_{\text{Paraffin}}$: 0.200 W/m/K
 - λ_{Luft} : 0.026 W/m/K
- Schaum-Matrix wurde mit Luft oder Paraffin (RT-31) gefüllt

Zellgeneration

Voronoi Zellen um Schaum zu generieren

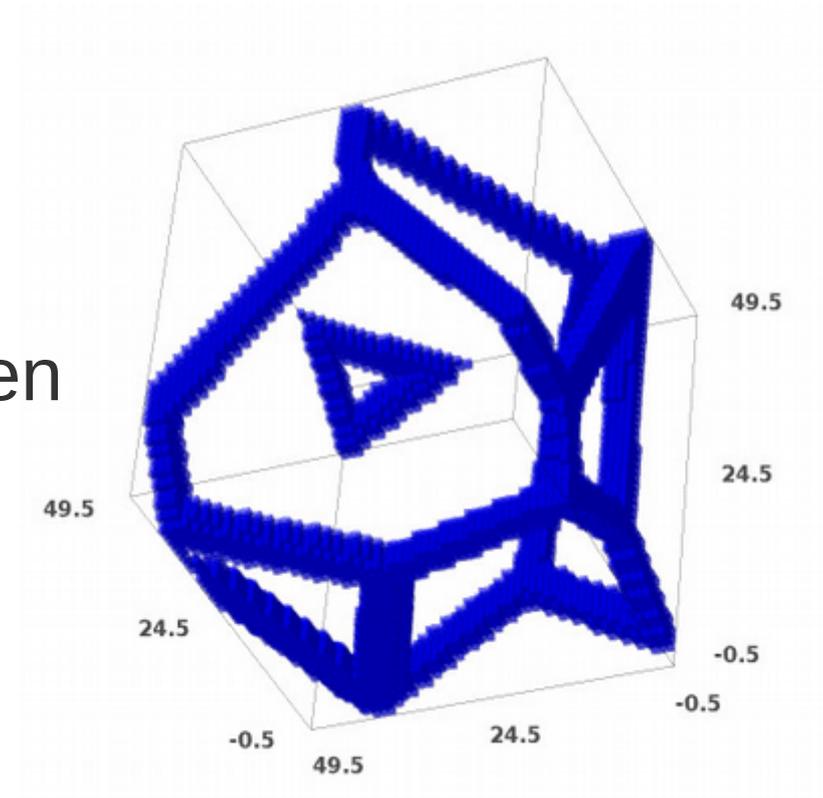
- Vorgabe: λ , Zelldurchmesser und Porosität



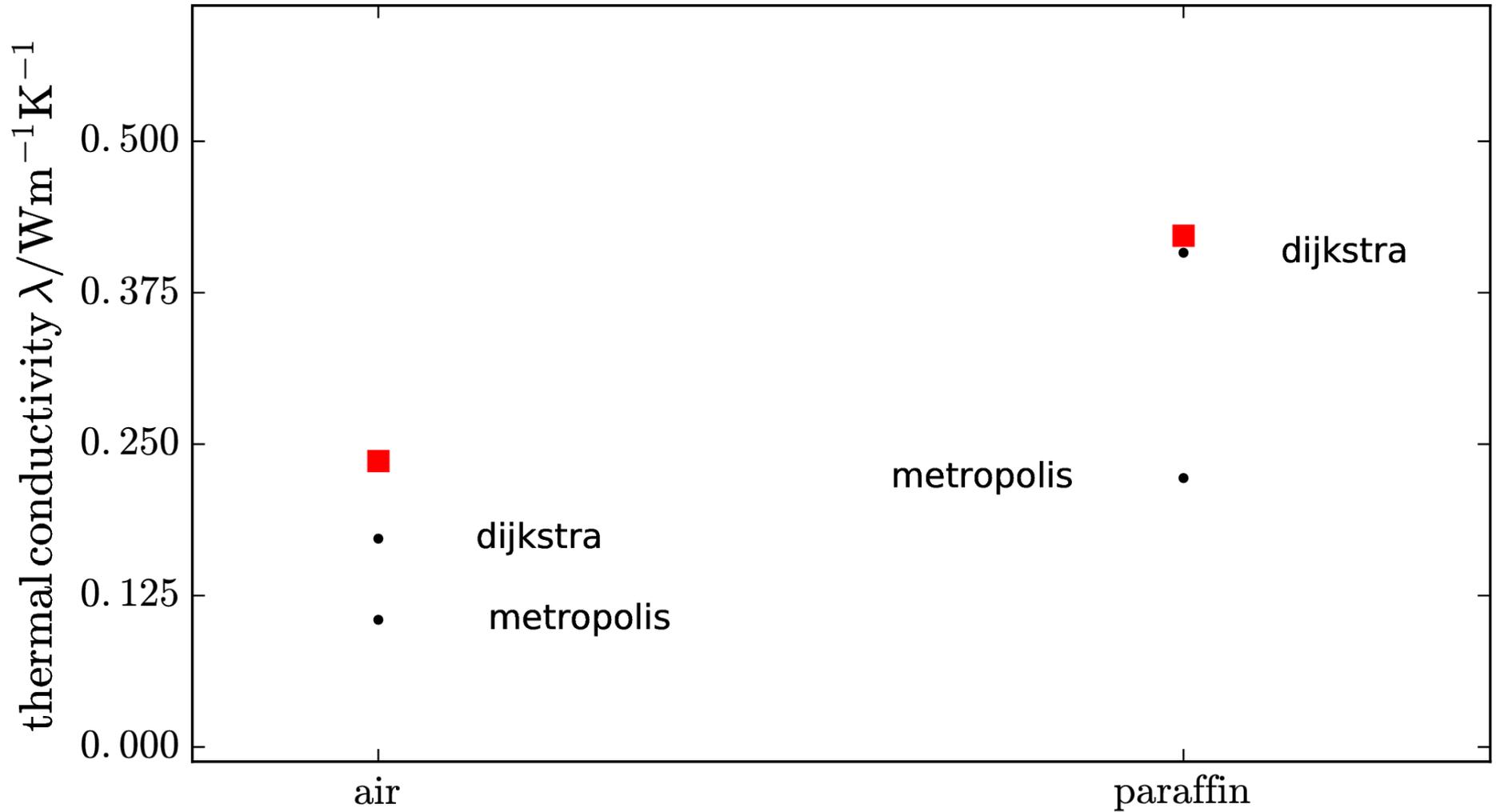
Zellgeneration

Voronoi Zellen um Schaum zu generieren

- Vorgabe: λ , Zelldurchmesser und Porosität
- λ zwischen zufällig gewählten (Mittel)Punkten als λ_{NiCrAl} setzen
- Zellwände entfernen und Zellstege verstärken

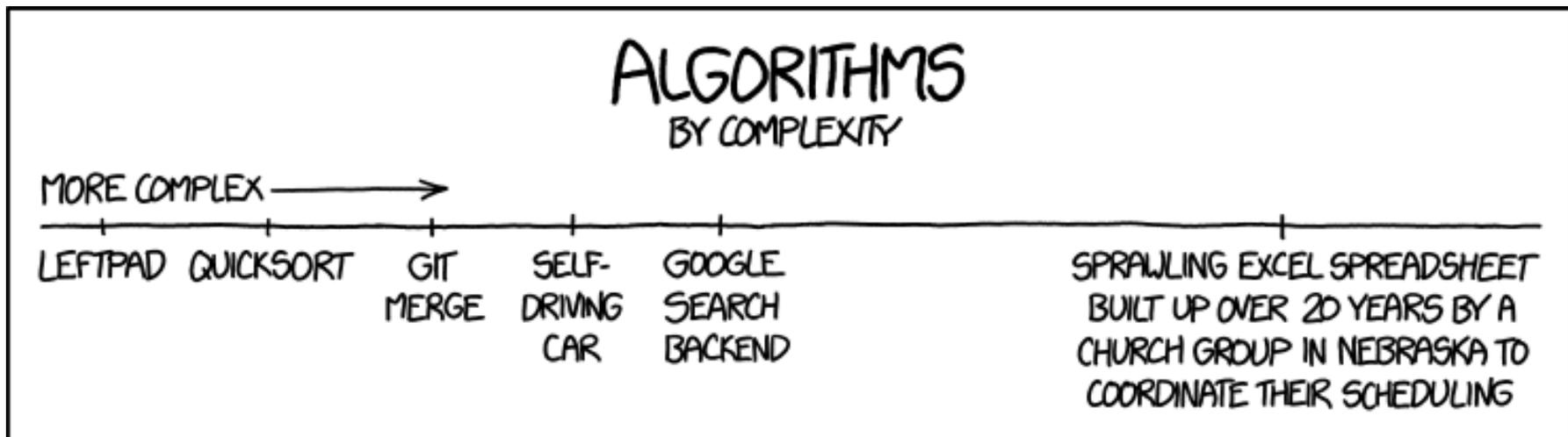


Ergebnisse

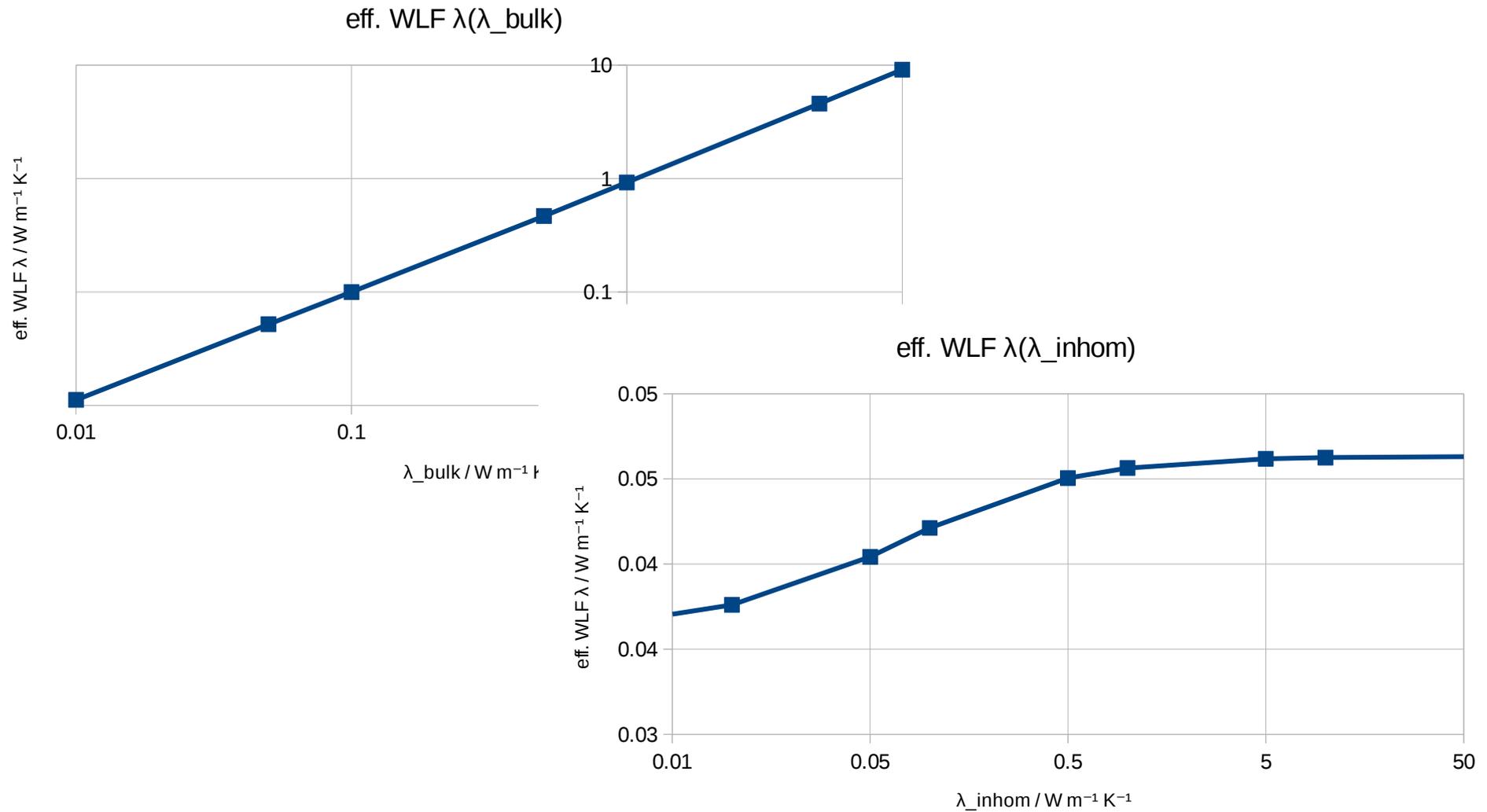


Zusammenfassung

- Ziel: Vorhersage der Gesamtwärmeleitfähigkeit in inhomogenen Systemen
- Ziel: (Experimentell) Rückschlüsse auf die Struktur
- Auf dem Weg dort hin: Einfluss der relevanten Parameter identifizieren und deren Zusammenhänge formulieren sowie neue Methoden in Betracht ziehen



Übergänge von Zuständen



Alternative Algorithmen



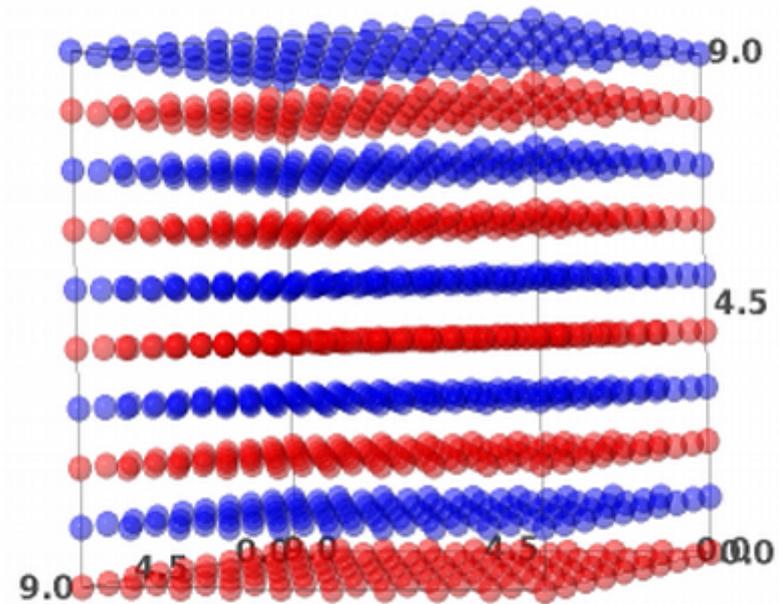
ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung

Layer:

konstante
z-Koordinate,

Widerstand einer
'layer' berechnen,
in Reihe schalten



Alternative Algorithmen



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung

Stacks:

feste (x,y)-
Koordinate,

Reihenschaltung
entlang z,

Parallelschaltung der
'stacks'

