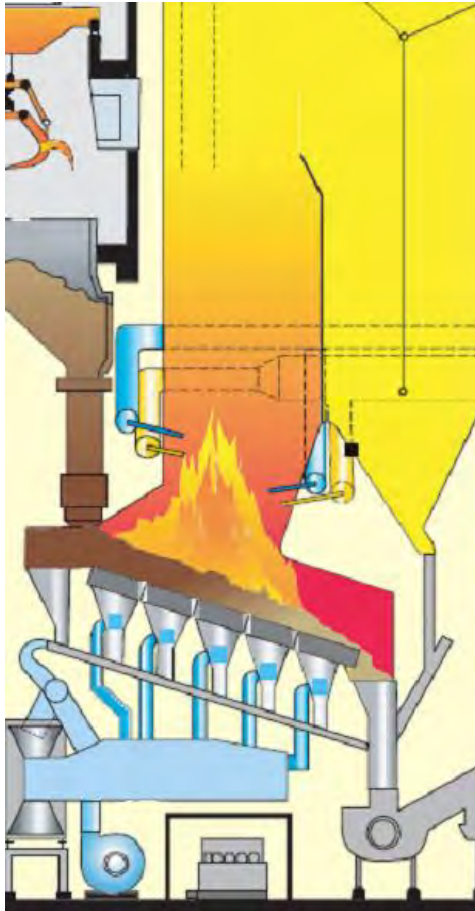


Modellierung der Wärmeübertragung in bewegten Schüttungen (auf Verbrennungsrosten)

Dr.-Ing. Siegmar Wirtz

- Einleitung und Zielsetzung
- Diskrete Elemente Methode
- Wärmeübertragungsmechanismen
 - Einzelpartikel
 - Partikelkollektive
 - reagierende Partikel
- Wie kann man dies im Kontext Rostverbrennung nutzen
- Ergebnisse für großtechnische Anlagen

Beispiel einer bewegten Schüttung:



Hausmüll ist ein spezieller Brennstoff:

- Große Bandbreite hinsichtlich Formen und Größen
- Inhomogene Eigenschaften: Zusammensetzung, H_u , ...
- Änderung der Form, Größe und Dichte während Verbrennung
- Mehrzahl der Partikel $Bi > 1$, innerer Wärmetransport wichtig

notwendige Vereinfachungen:

- Partikelgeometrie = repräsentative kugelförmige Partikel
- Bildung von Agglomeraten = Kohäsionsmodell
- Mischung und Verweilzeit = Kontrolliert durch die Rostbewegung
- individuelle mechanische & thermochemische Eigenschaften = Häufigkeitsverteilungen und partikelbasierte Simulation

=> Diskrete Elemente Methode

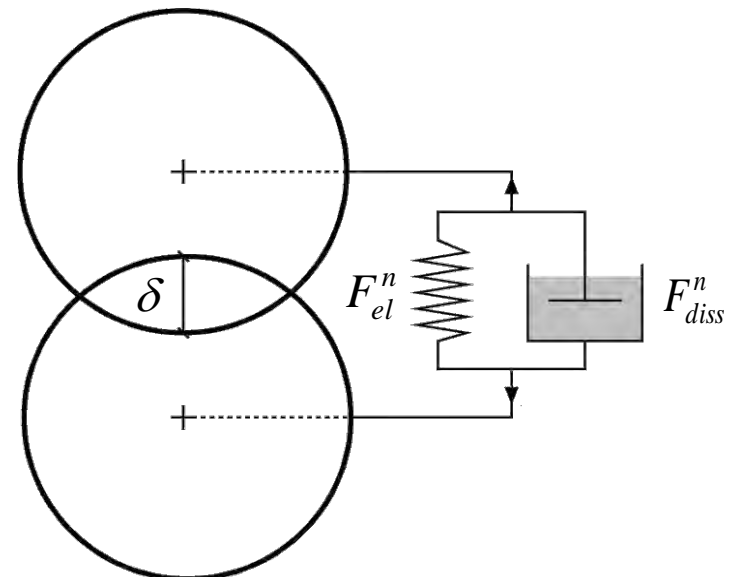
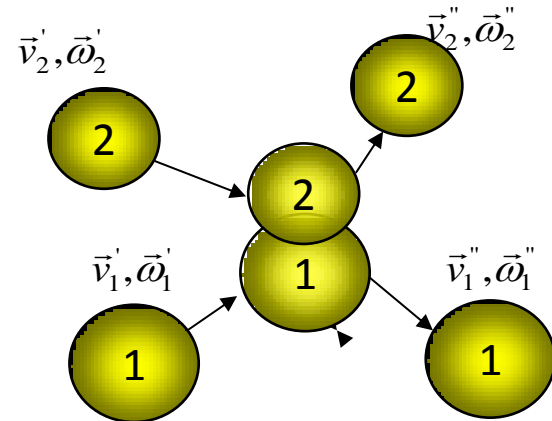
- starre Partikel
- Mehrkörperkontakte
- Beschreibung der Bewegung durch:

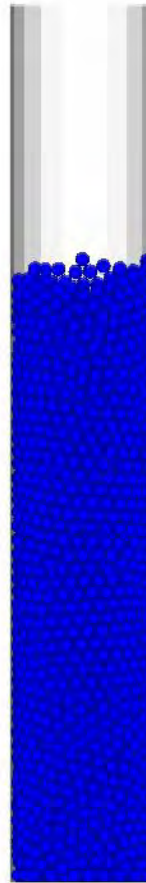
– Newton-Gleichung

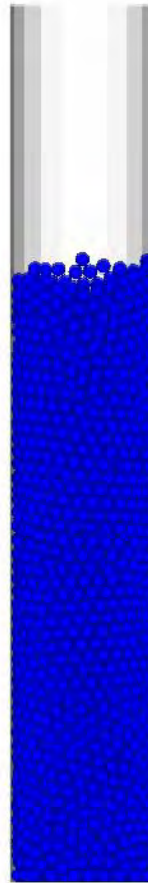
$$m_i \frac{d^2 \vec{x}_i}{dt^2} = m_i \vec{g} + \sum_{j=1}^N \vec{F}_{ij}$$

– Euler-Gleichung

$$I_i \frac{d^2 \vec{\varphi}_i}{dt^2} = \sum_{j=1}^N \vec{M}_{ij}$$

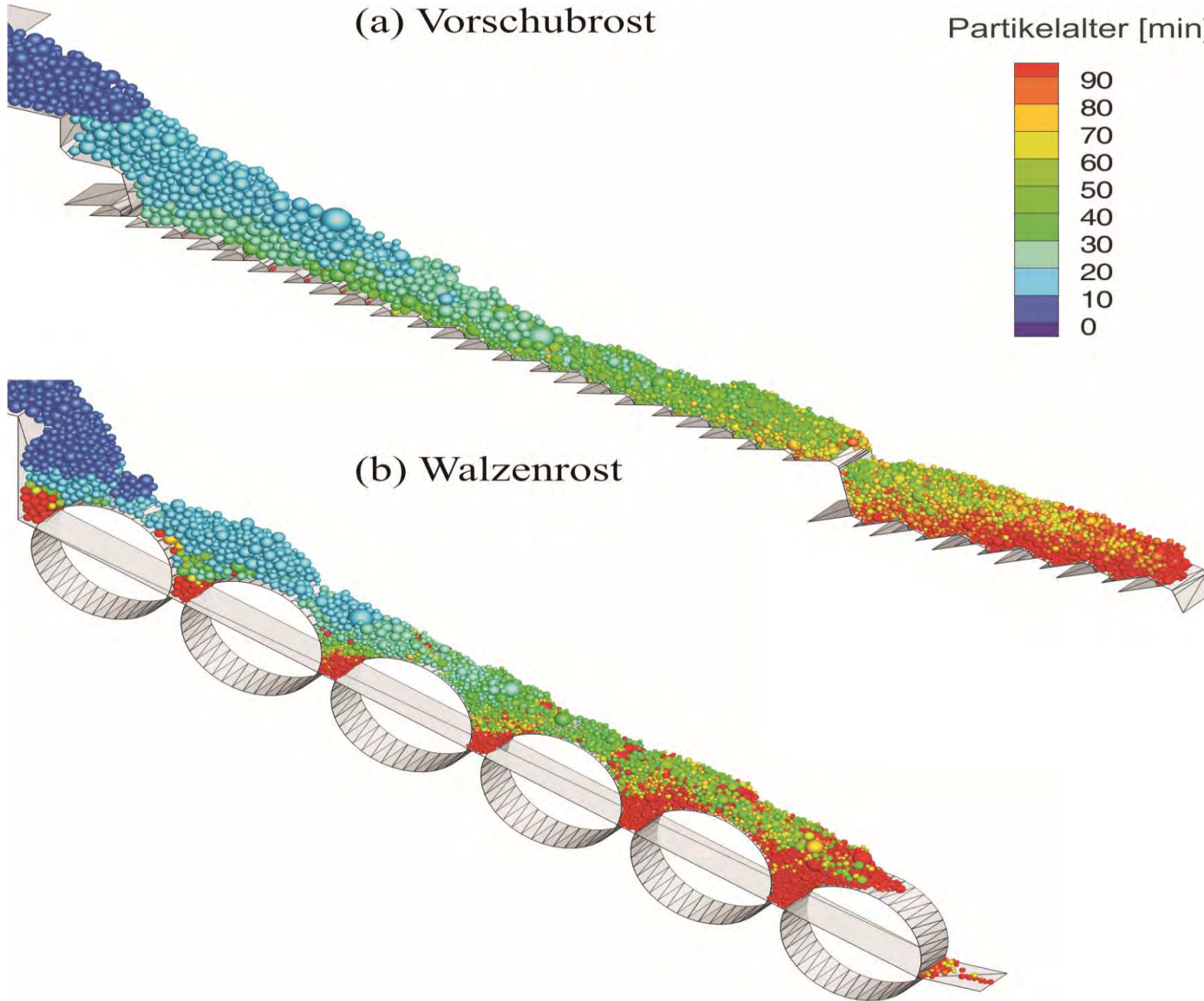
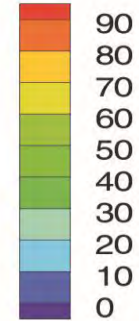




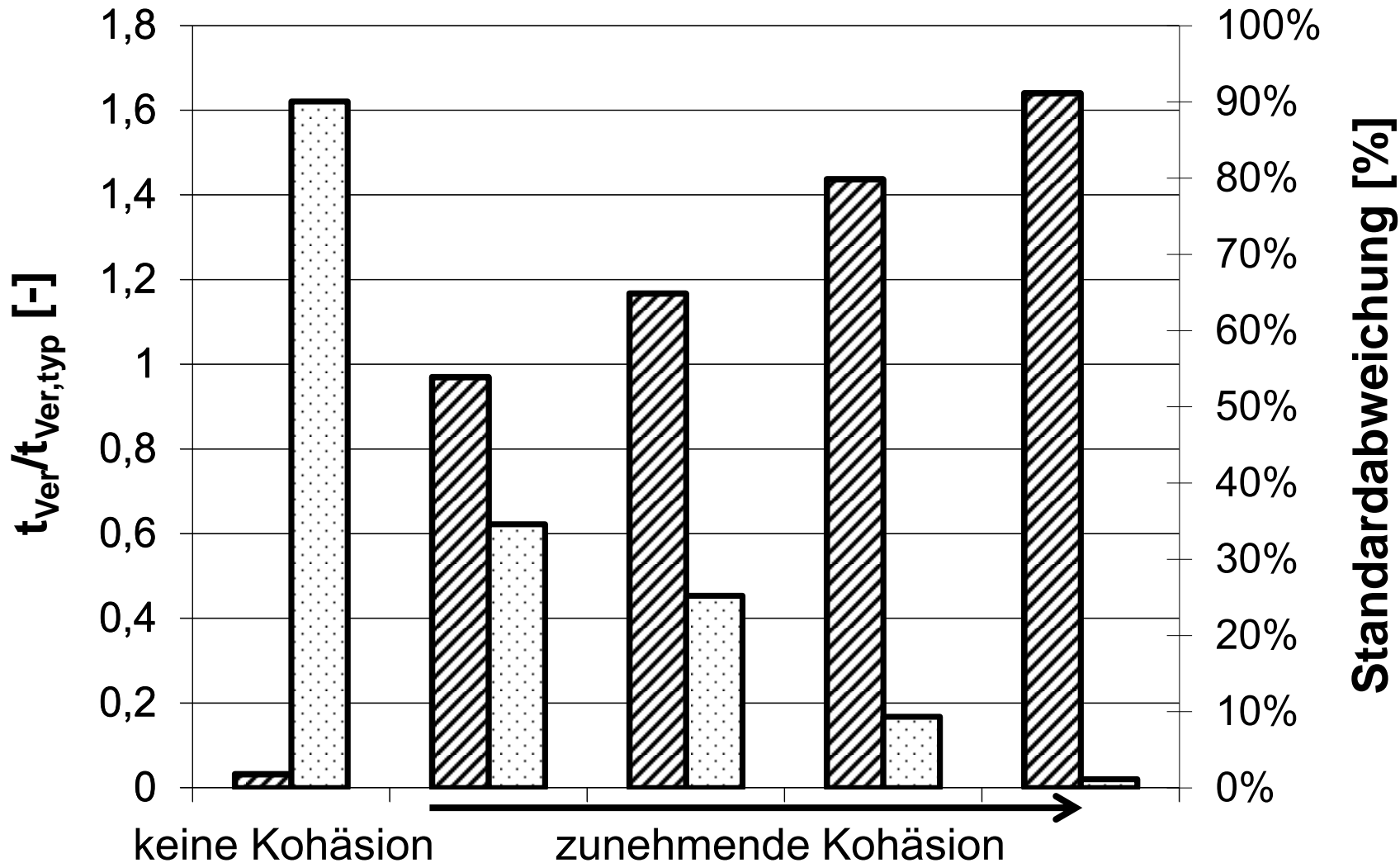


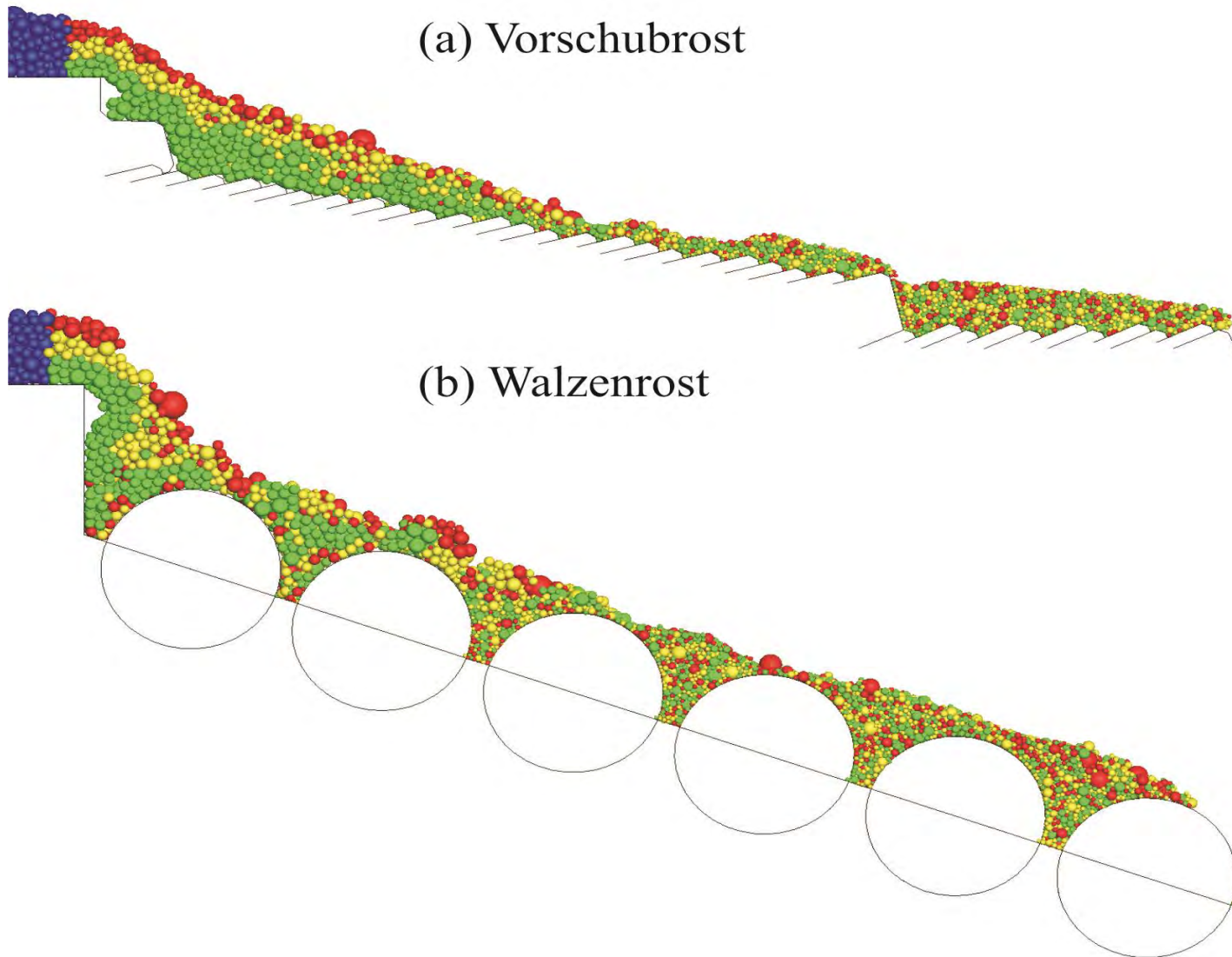
(a) Vorschubrost

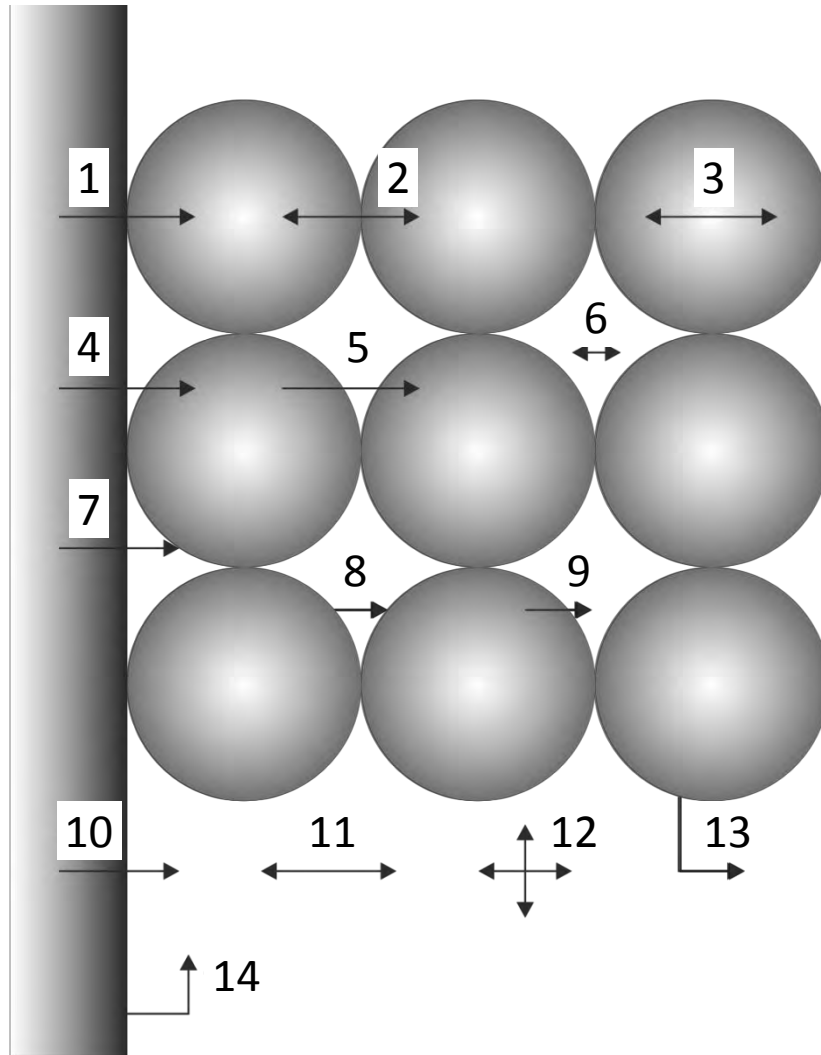
Partikelalter [min]



(b) Walzenrost







Leitung

1. Wand – Partikel
2. Partikel – Partikel
3. Innerhalb des Partikels
4. Wand – Gas – Partikel
5. Partikel – Gas – Partikel
6. Gas

Strahlung

7. Wand – Partikel
8. Partikel – Partikel
9. Partikel – Gas
10. Wand – Gas
11. Gas

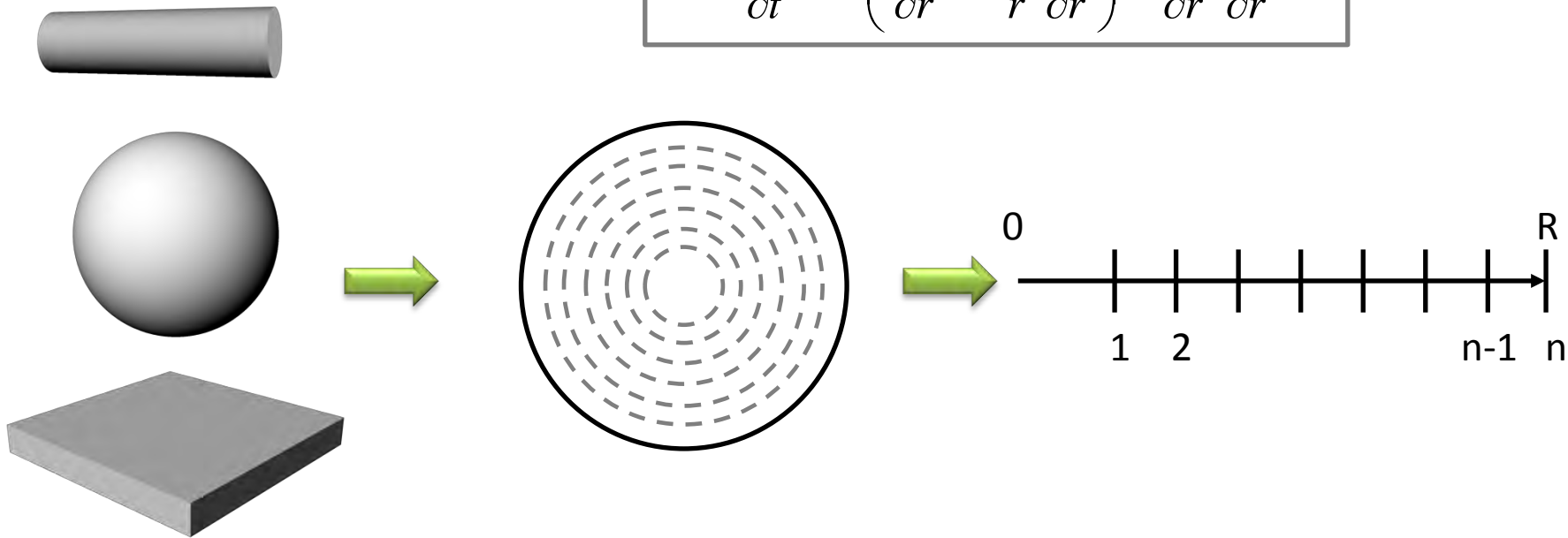
Konvektion

12. Mischung von Gasströmen
13. Partikel – Gas
14. Wand – Gas

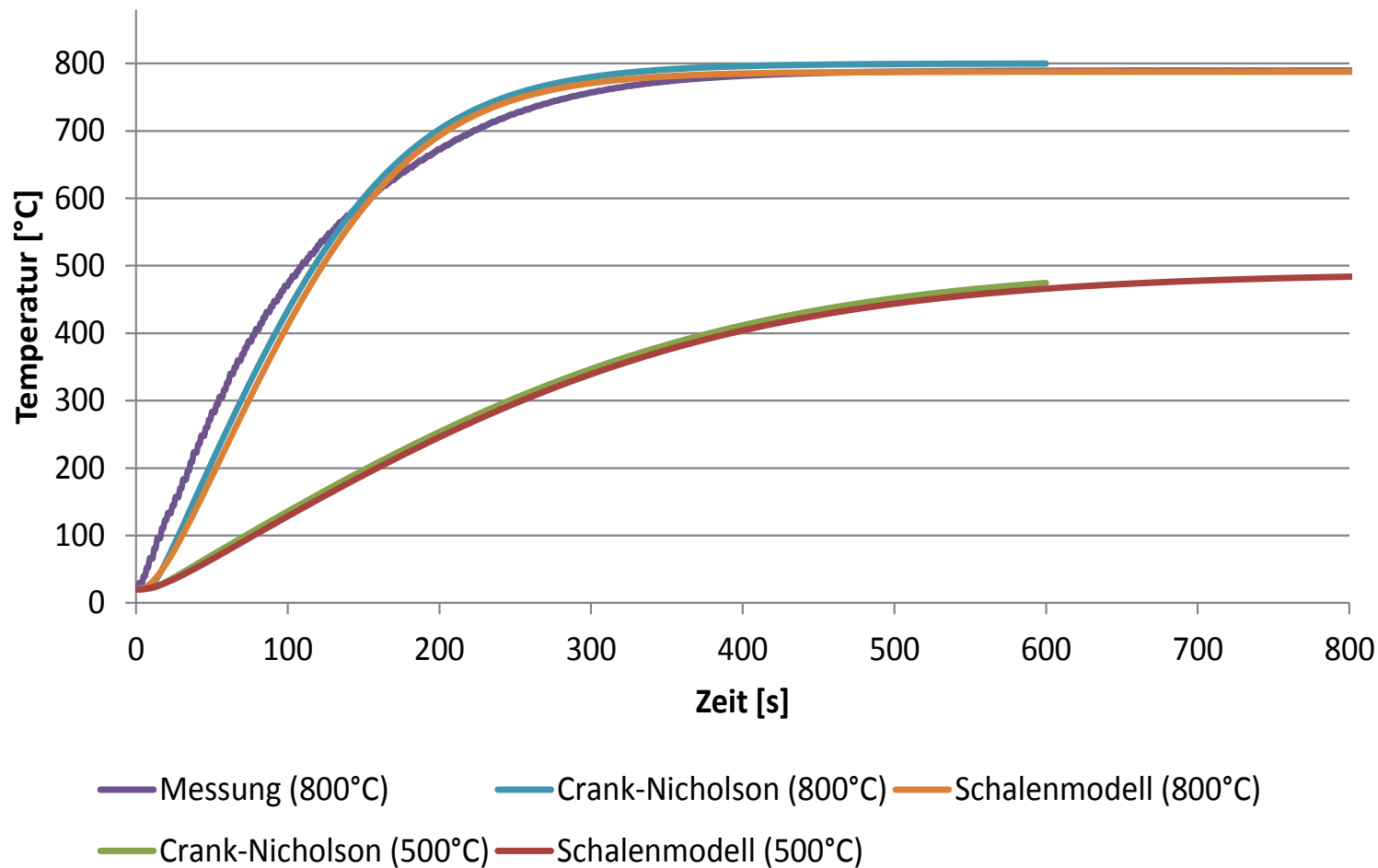
Modellierung der Wärmeleitung innerhalb des Partikels:

- Reduktion der Wärmeleitung auf einen 1-dimensionalen Fall
- Kugel: $n=2$, Zylinder: $n=1$, Platte: $n=0$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{n}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial \lambda}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} + \dot{q}$$



DEM



Wärmestrom:

$$Q_{P_1 \rightarrow P_2} = \left(\frac{1}{R_G} + \frac{1}{R_C} \right) * \Delta T$$

Wärmeleitung Partikel-Partikel (Basis Hertz):

$$R_C = \frac{1}{2 * k_S * r_C}$$

k_S : Wärmeleitfähigkeit Partikel

$$r_C = \left(\frac{3 * (1 - \gamma^2) F_N * r_{hm}}{2 * E_{hm}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

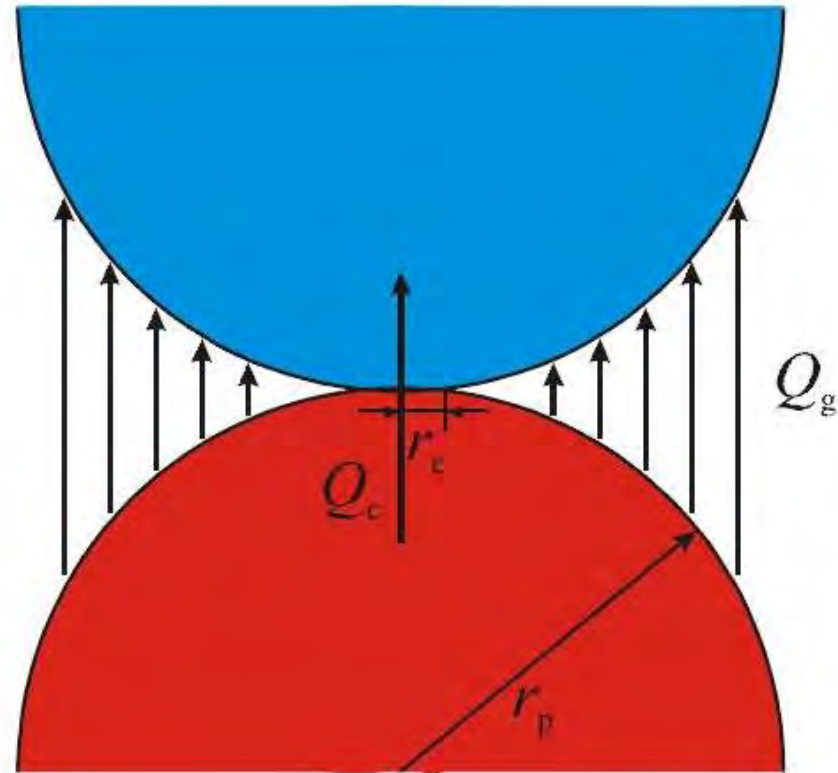
Wärmeleitung Partikel-Fluid-Partikel

$$R_G = \frac{l_G}{A_G * k_G}$$

k_G : Wärmeleitfähigkeit Gas

$$A_G = 2 * \pi * r_P^2 - \pi * r_C^2$$

$$l_G = \frac{r_P^2 * \left(1 - \frac{\pi}{4} \right)}{r_P - r_C}$$

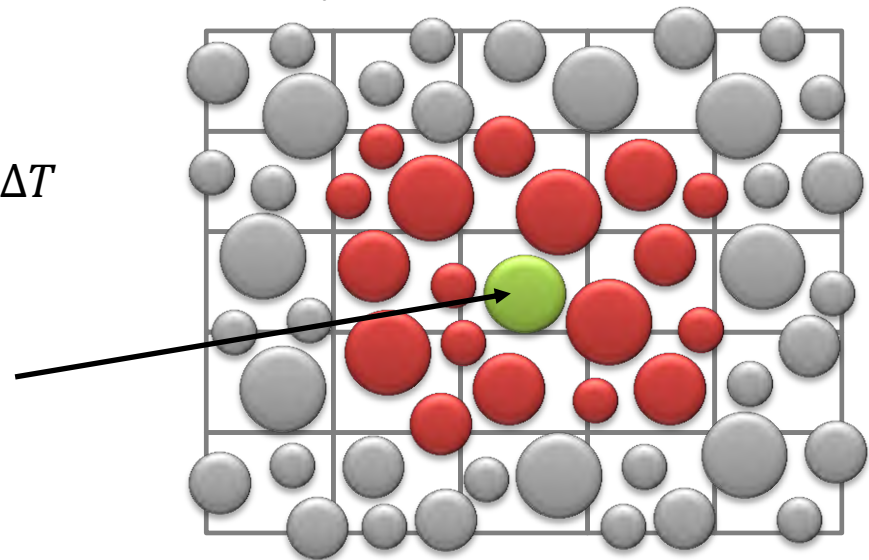


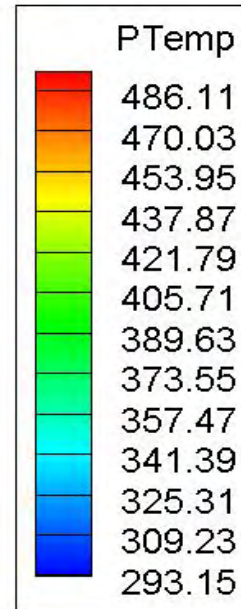
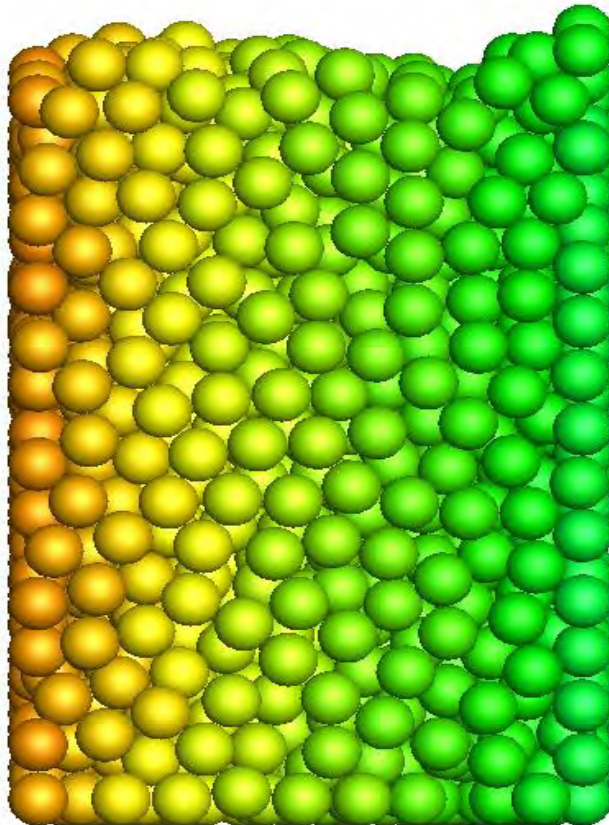
Wärmeleitung in ruhender Schüttung:

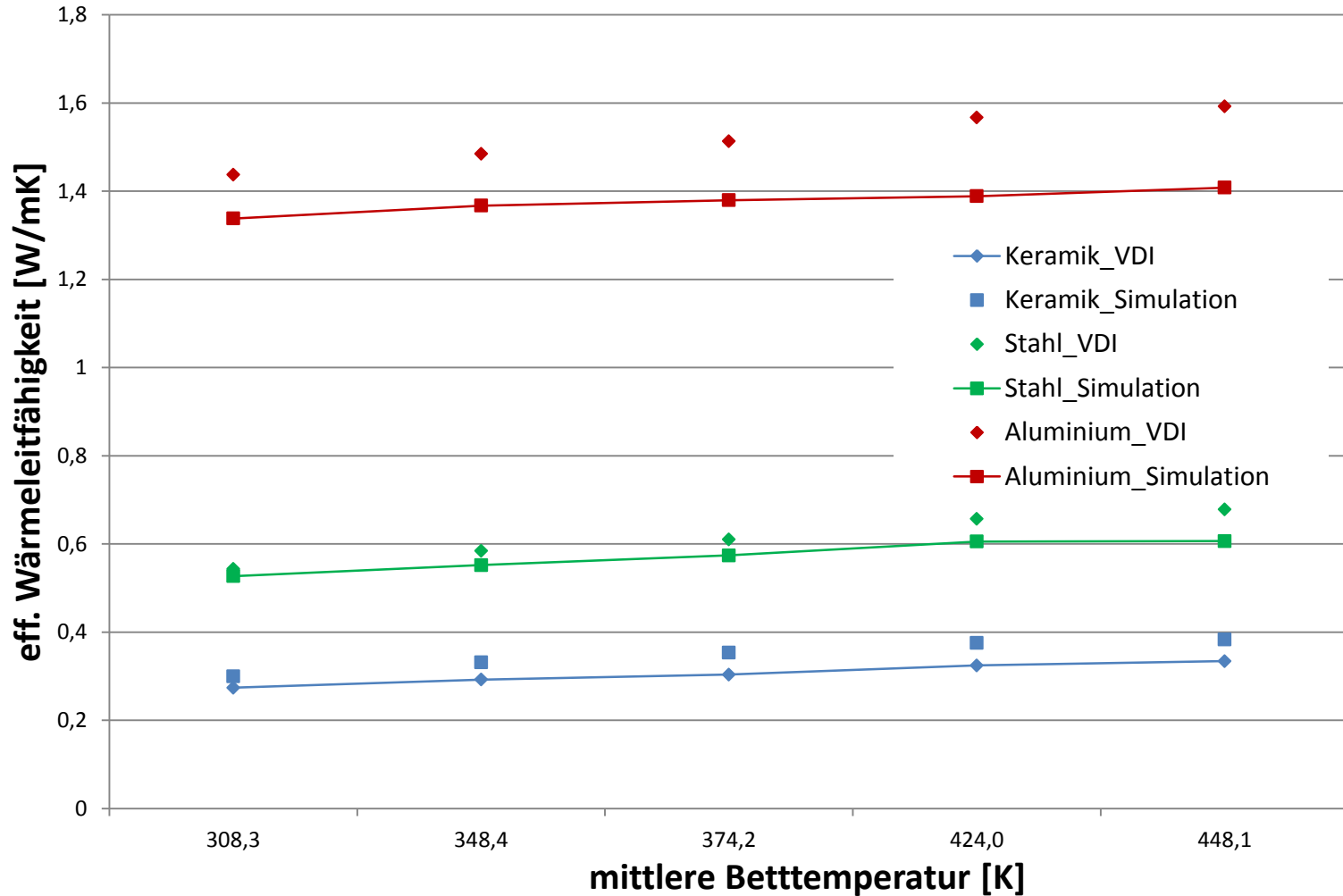
- vereinfachtes Modell analog zum Partikelstrahlungsmodell
- Bezugsraum wird über das DEM-Gitter bestimmt (Nachbarzellen)
- Alle Partikel in diesem Gebiet tauschen Wärmeströme mit dem Bezugspartikel aus
 - eff. Wärmeleitung aus Partikelkontakt und Wärmeleitung durch den Gasraum
 - λ_{eff} über Korrelation berechnet (VDI-Wärmeatlas)

$$Q_{Kontakt} = \frac{\lambda_{eff}}{Distanz} * A_{Partikel} * \Delta T$$

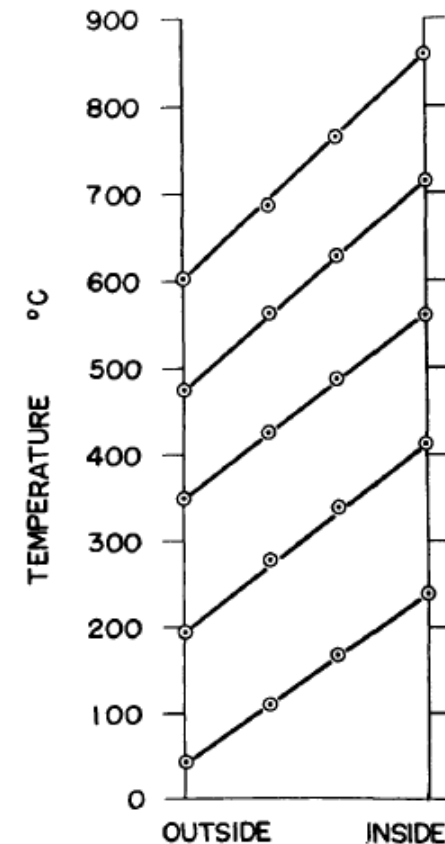
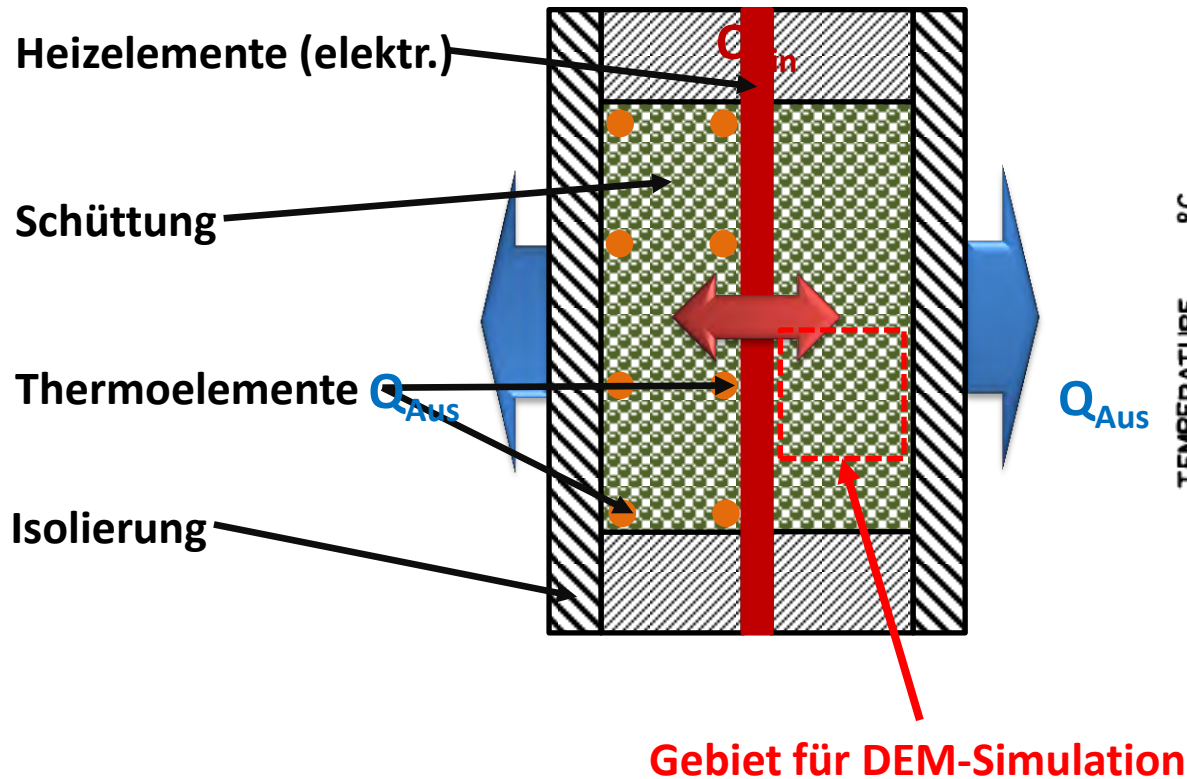
Bezugspartikel (BP)





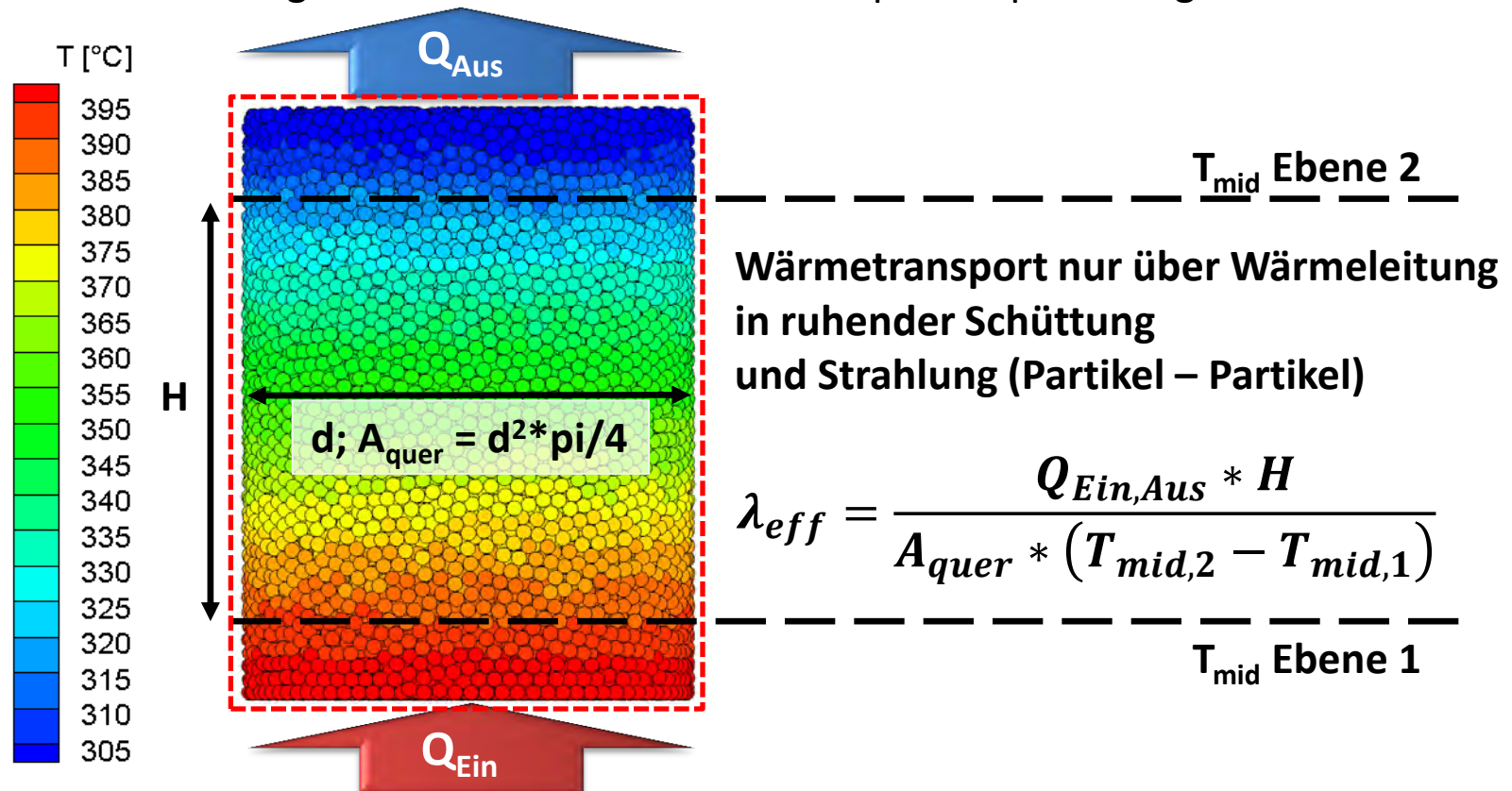


- Vergleich mit Messdaten von Yagi & Kunii (1957) – VDI-Wärmeatlas
- Messungen im stationären Zustand: $Q_{\text{Ein}} = Q_{\text{Aus}}$
- λ_{eff} wird über die Temperaturdifferenz im Schüttungsbett bestimmt

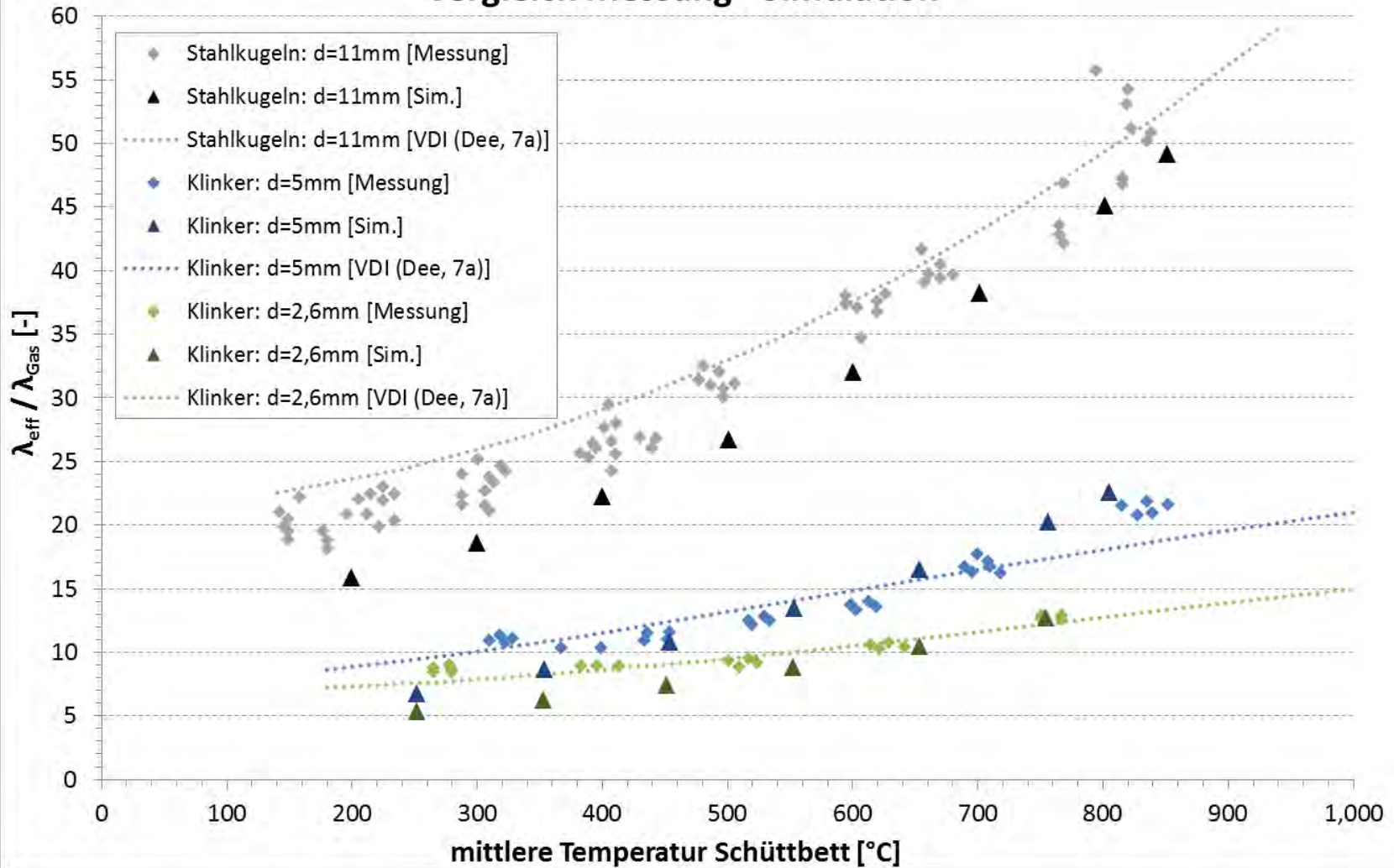


Randbedingungen der DEM-Simulationen

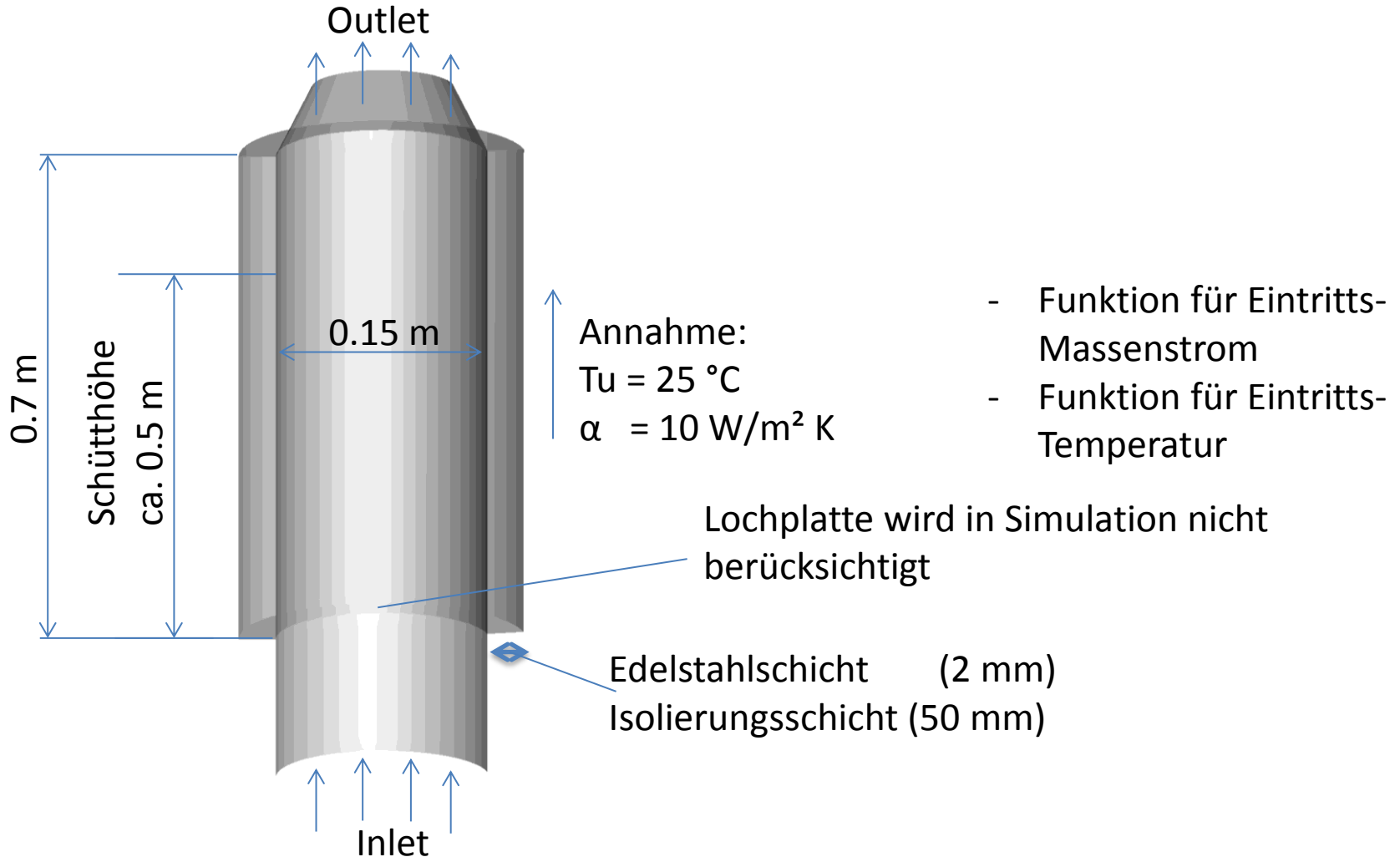
- Simulation der Wärmeleitung durch Schüttbett
- Vorgeben eines konstanten Eingangs- und Ausgangswärmestromes
- Auswertung nachdem sich stationäres Temperaturprofil eingestellt hat



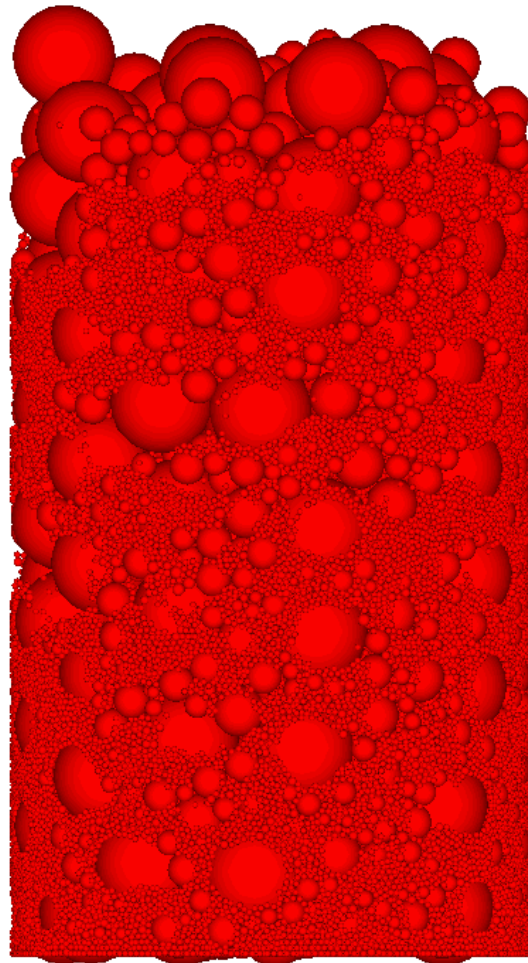
Effektive Wärmeleitfähigkeit einer Schüttung Vergleich Messung - Simulation



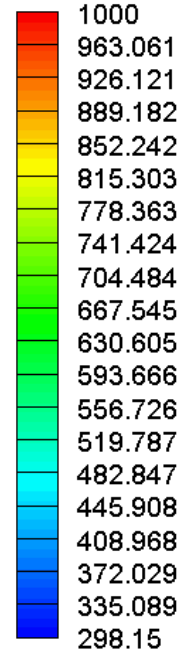
Randbedingung – Simulation Aufheizung von Stahlkugeln im „Rosttopf“



t = 0.04s

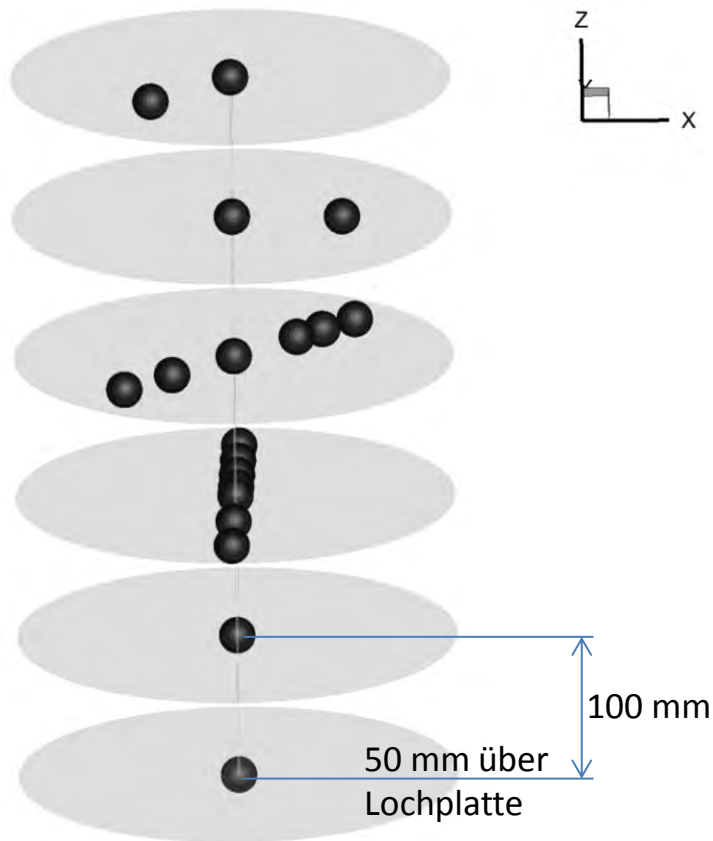


Temperatur [K]



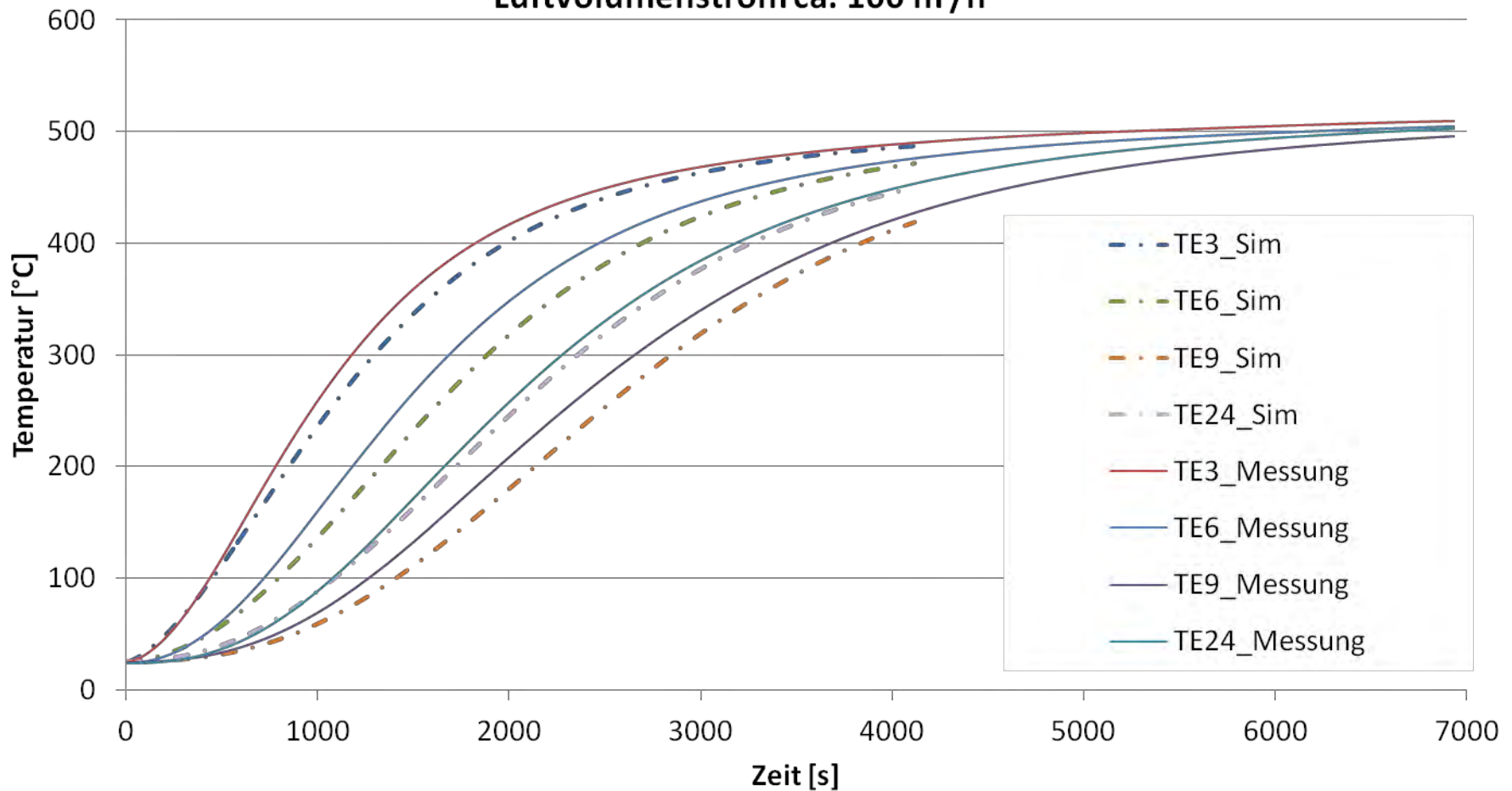
Messkonzept

© VDI Wissensforum 2013 - Vervielfältigungsmöglichkeit - nur zum persönlichen Gebrauch



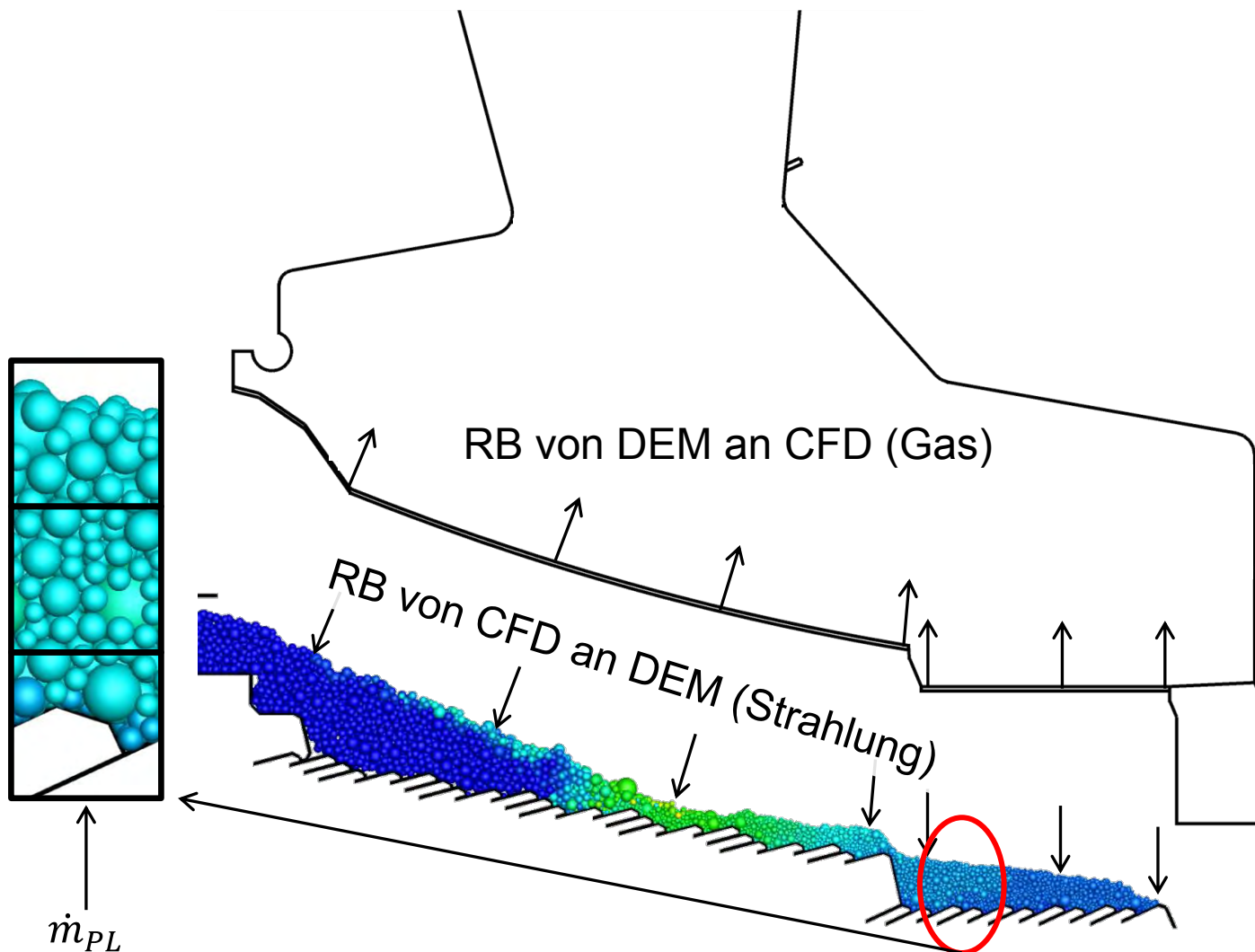
- Messung der Partikeltemperatur auf 6 Ebenen
 - Auf 4 Ebenen: Radiales Profil
- Messung der Gastemperatur am Ein- und Austritt
- Druckmessung:
 - vor und nach Lochplatte
 - oberhalb der Schüttung

DEM/CFD - Partikelheizung \varnothing 25 mm
 Vergleich Simulation/Messung
 Luftvolumenstrom ca. 100 m³/h



CFD-Model

DEM-Model



$$\dot{m}_{PL}$$

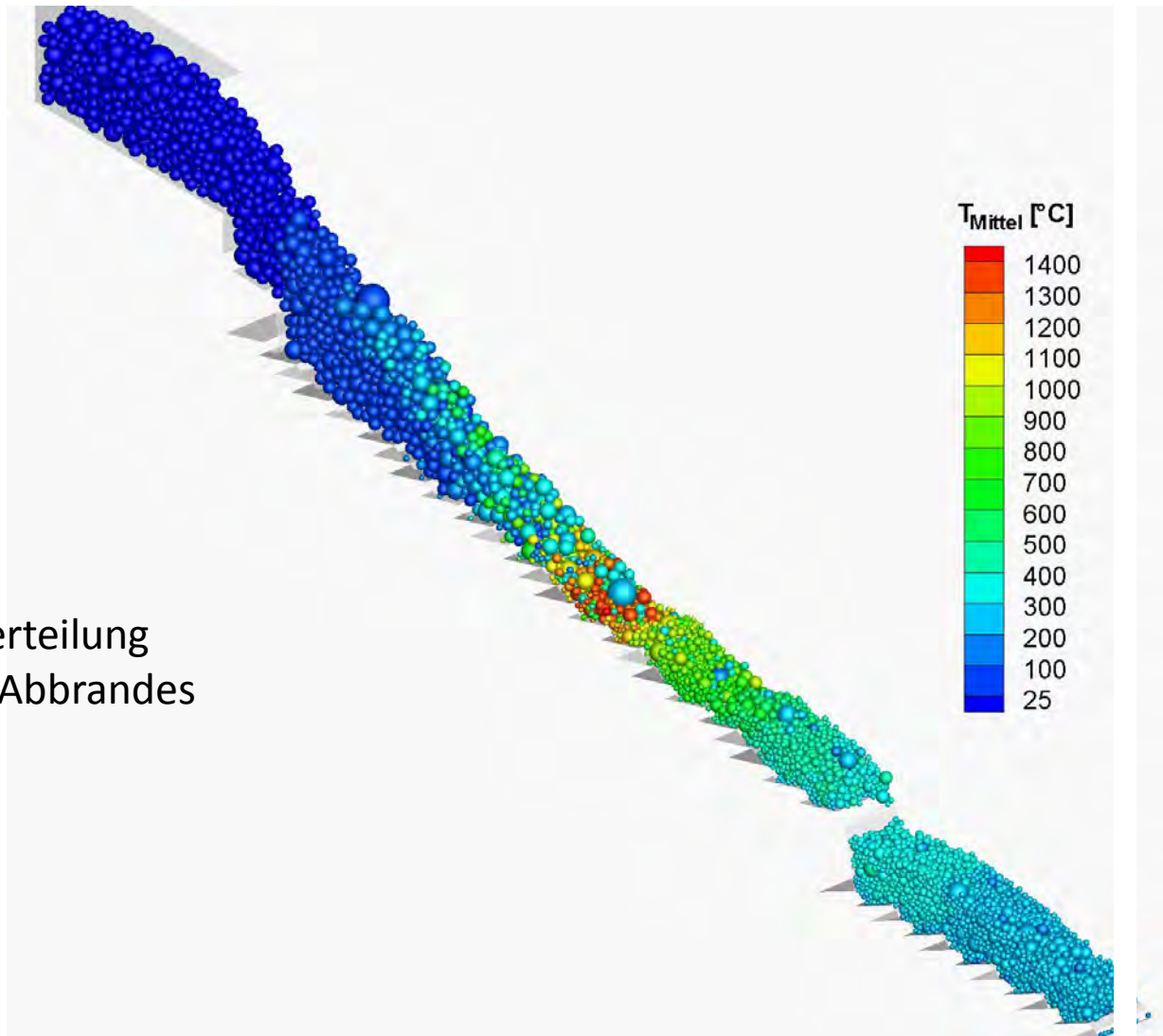
CFD-Model (Fluent, 3-dimensional, stationär)

- Turbulenzmodell: $k-\omega$ SST
- Reaktionsmodell: Eddy Dissipation & Finite Rate Chemistry
- Strahlungsmodell: P1

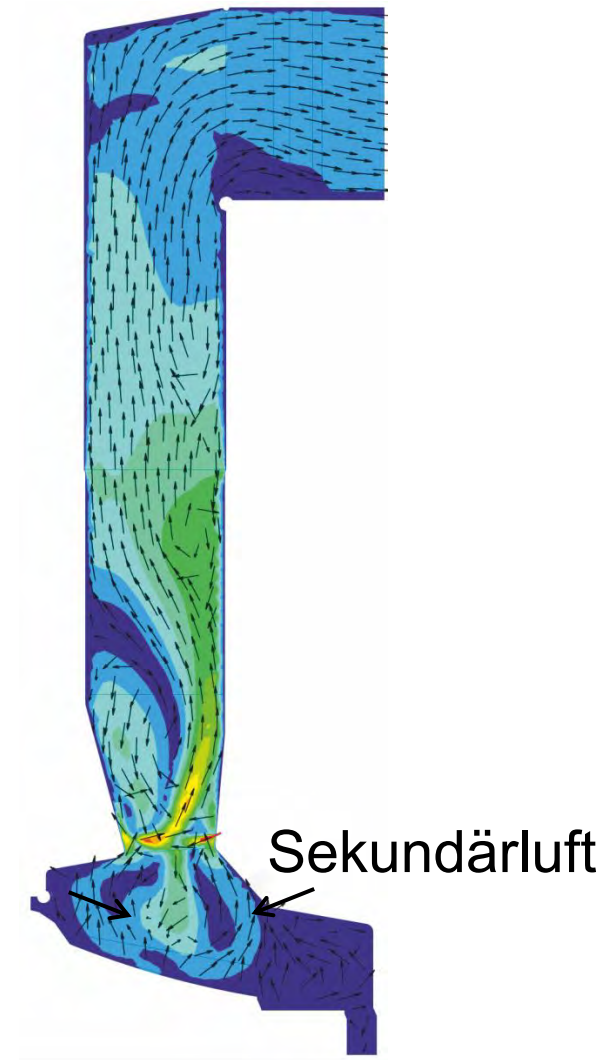
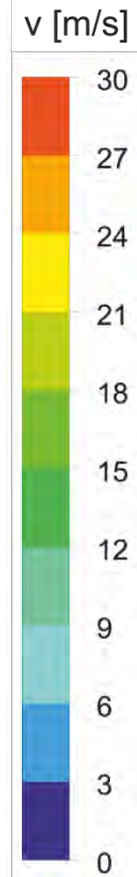
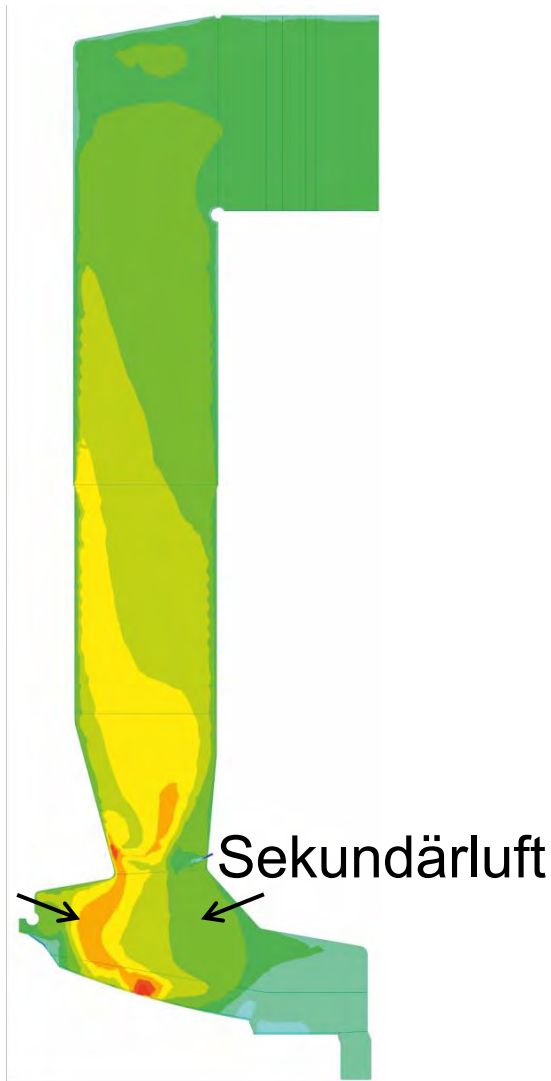
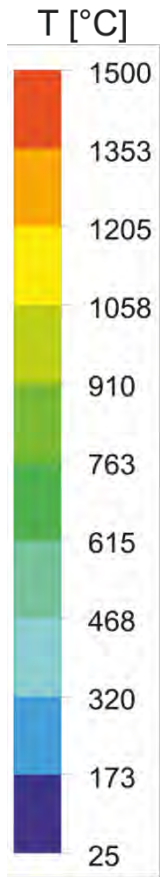
DEM-Model (3-dimensionaler Streifen, instationär)

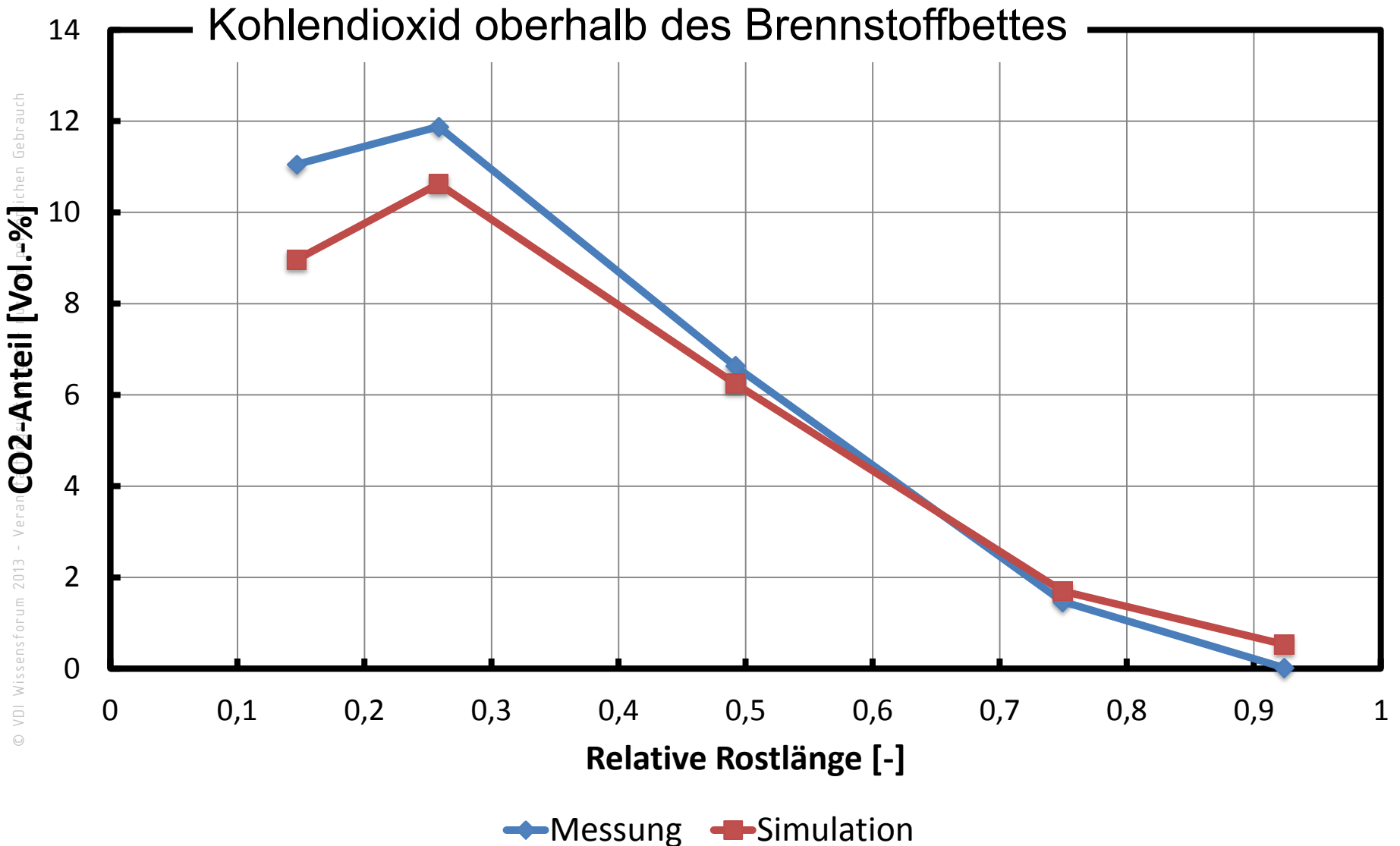
- Partikelzahl auf Rost: ~8000
- Unterer Heizwert: 10 MJ/kg
- Massenanteil Holz: 15 %
- Massenanteil Kunststoff: 15 %
- Massenanteil Organik: 30 %
- Massenanteil Inert: 20 %
- Massenanteil Rest: 20 %

Diss. B. Brosch, Bochum, 2012



Temperaturverteilung
während des Abbrandes





- Rostfeuerungen werden durch die Wechselwirkung von Bettbewegung und Strahlungswärmestrom beeinflusst.
- Korrekte Abbildung der Wärmeübertragung in der bewegten Schüttung ist entscheidend.
- DEM-Simulation kann Details der Prozesse abbilden.
- Messungen der Strahlungswärmeströme auf ein Brennbett in MVA's existieren derzeit noch nicht.

Das DEM-Team des LEAT:

- Frederik Elskamp
- Jennifer Hold
- Dominik Höhner
- Bastian Krause
- Harald Kruggel-Emden
- Hendrik Komossa
- Tobias Oschmann
- Gerd Stein
- Florian Sudbrock
- Kevin Vollmari
- Jens Wiese
- Frank Wissing

Vielen Dank für
Ihre Aufmerksamkeit