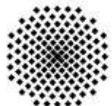

Promotionsvortrag

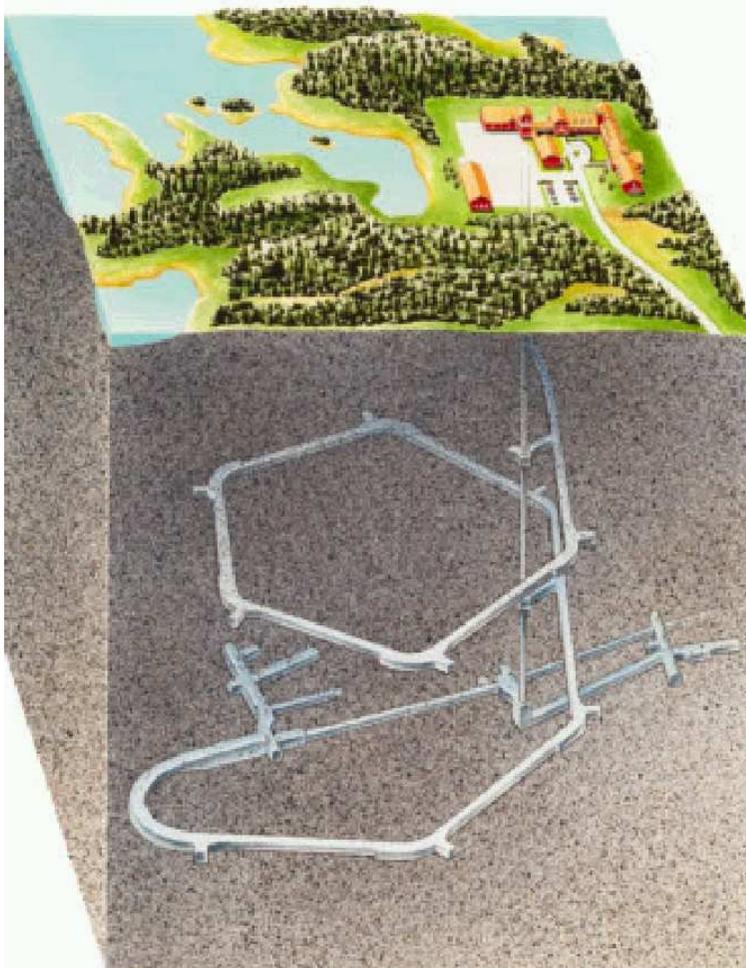
Simulation nicht-isothermer Gas- Wasser-Prozesse in komplexen Kluft-Matrix-Systemen

Hartmut Jakobs

5.12. 2003

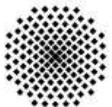


Das Äspö-Felslabor

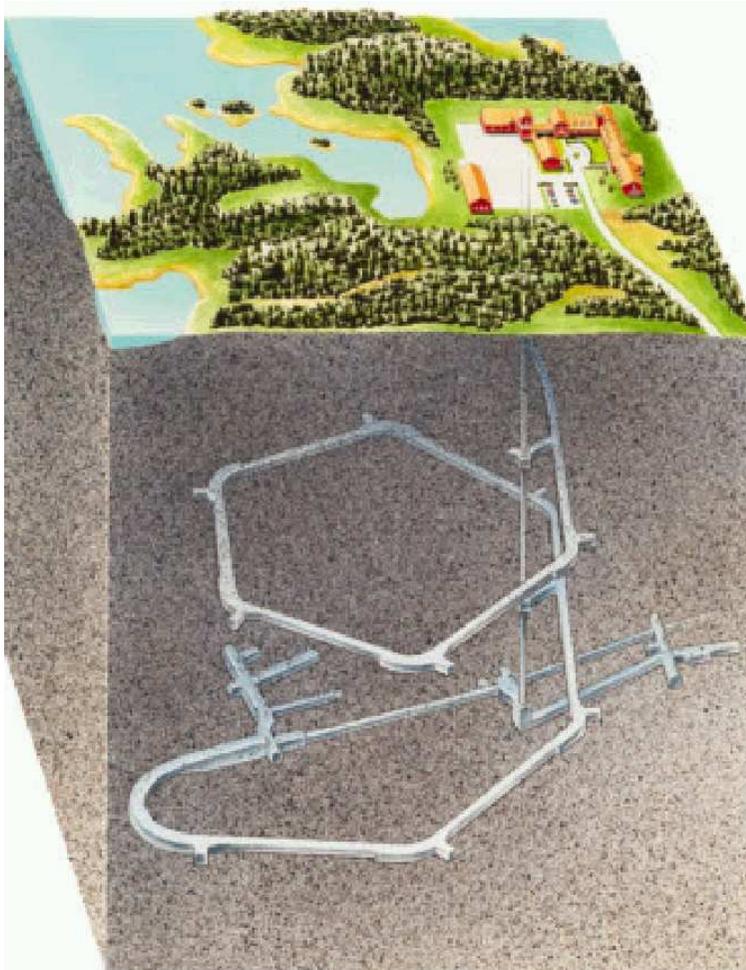


Äspö Felslabor der
„Schwedischen Gesellschaft
für die
Behandlung nuklearer Abfälle“

500 m

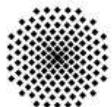


Motivation

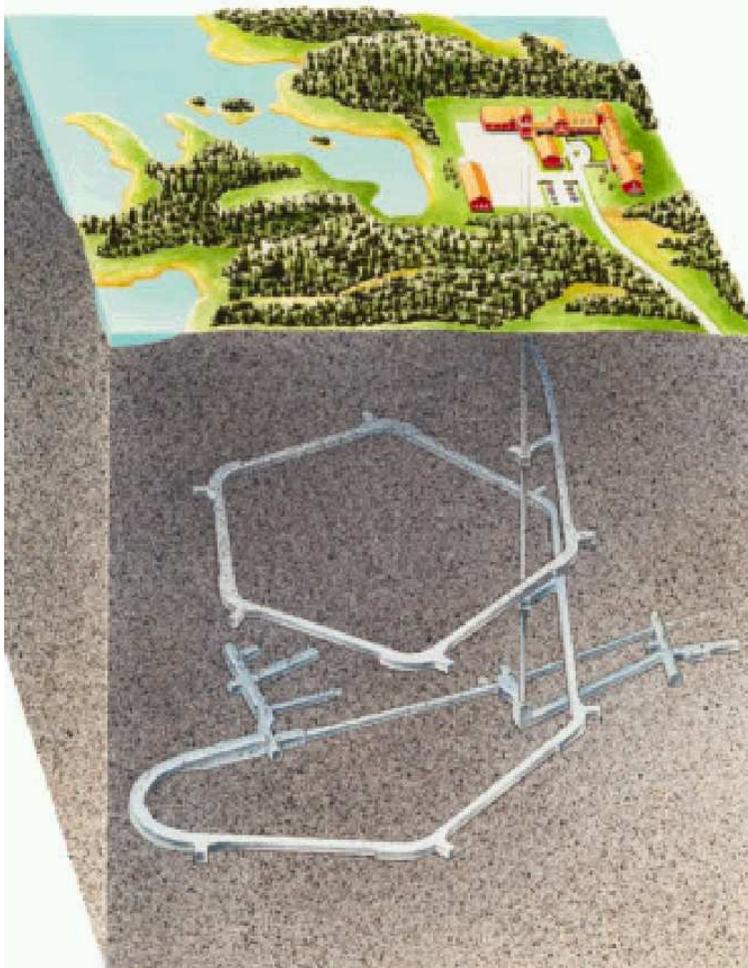


Bei Experimenten zur Bestimmung der Transmissivität von Kluftsystemen wurde eine Verringerung der Transmissivität während des Experimentverlaufs gemessen.

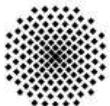
Diese Verringerung ist unter der Annahme vollständiger Wassersättigung nicht erklärbar.



Entgasung in der Nähe von Endlagern

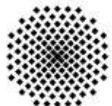


Reduktion der
Transmissivität ist nur
durch Einbeziehung der
Entgasung zu erklären.



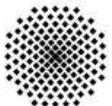
Gliederung des Vortrags

1. Entgasung in der Nähe von Endlagern
2. Einordnung des Problems
3. Erfassung der Entgasung auf der Mikroskala
4. Upscaling der Parameter auf die Makroskala
5. Homogenisierung mittels Renormalisierung
6. Erfassung der Entgasung auf der Makroskala
7. Zusammenfassung und Ausblick

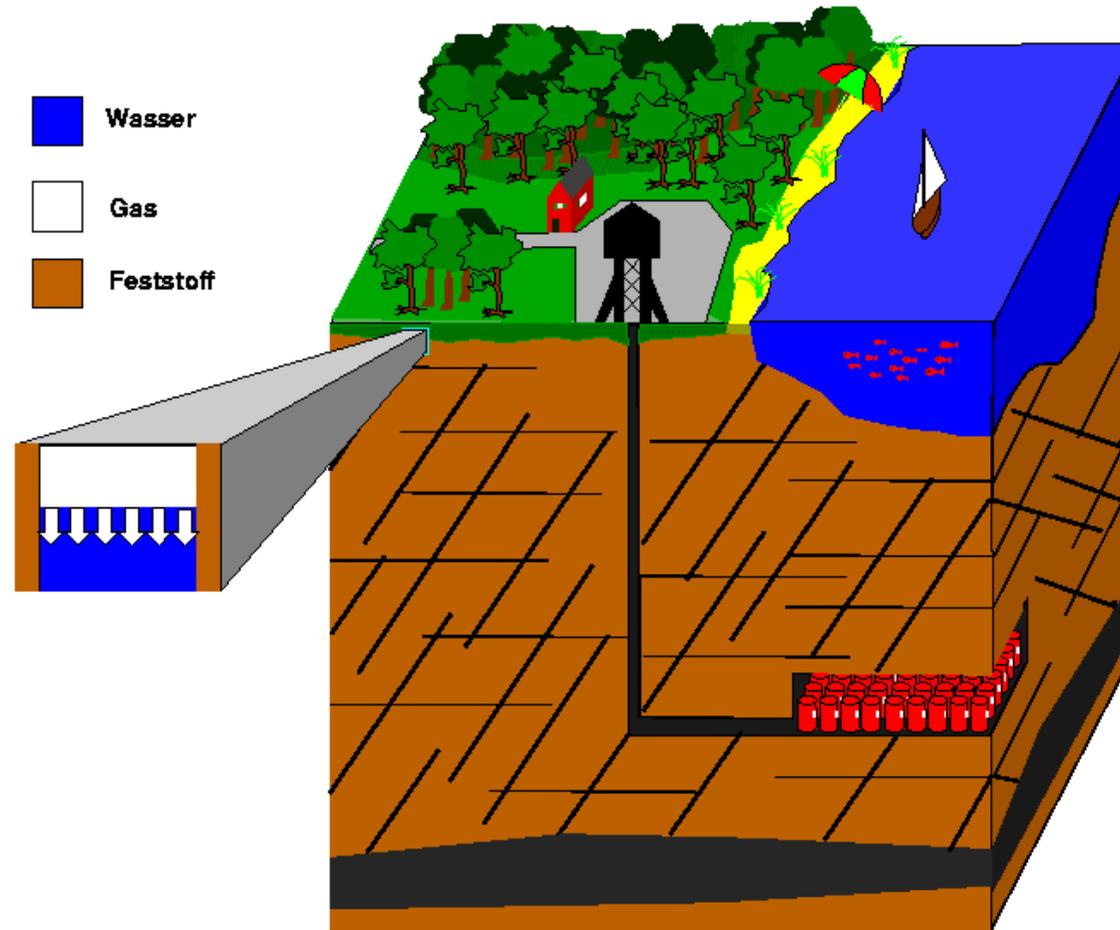


Gliederung des Vortrags

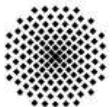
1. Entgasung in der Nähe von Endlagern
2. Einordnung des Problems
3. Erfassung der Entgasung auf der Mikroskala
4. Upscaling der Parameter auf die Makroskala
5. Homogenisierung mittels Renormalisierung
6. Erfassung der Entgasung auf der Makroskala
7. Zusammenfassung und Ausblick



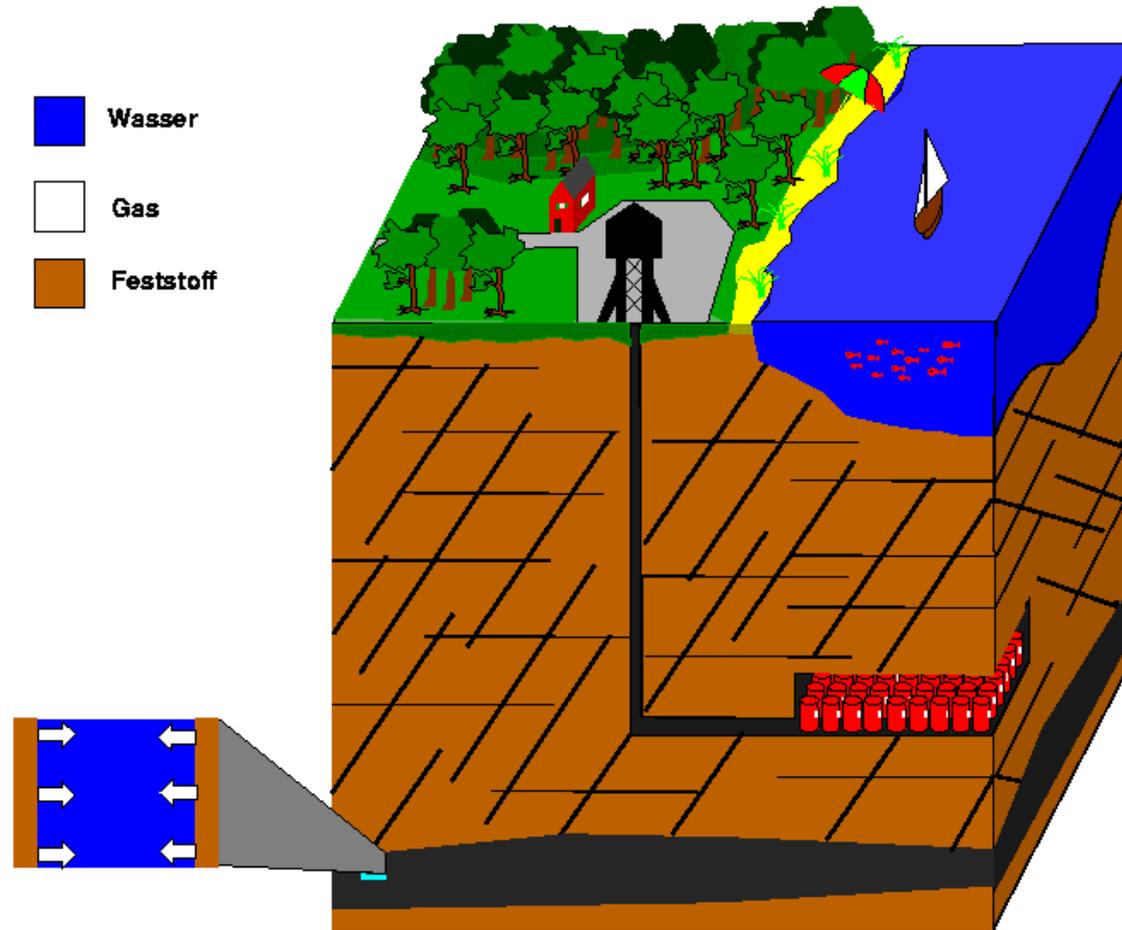
Entgasungsprozesse in der Nähe von Endlagern



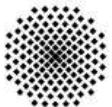
Gas löst sich in der ungesättigten Zone



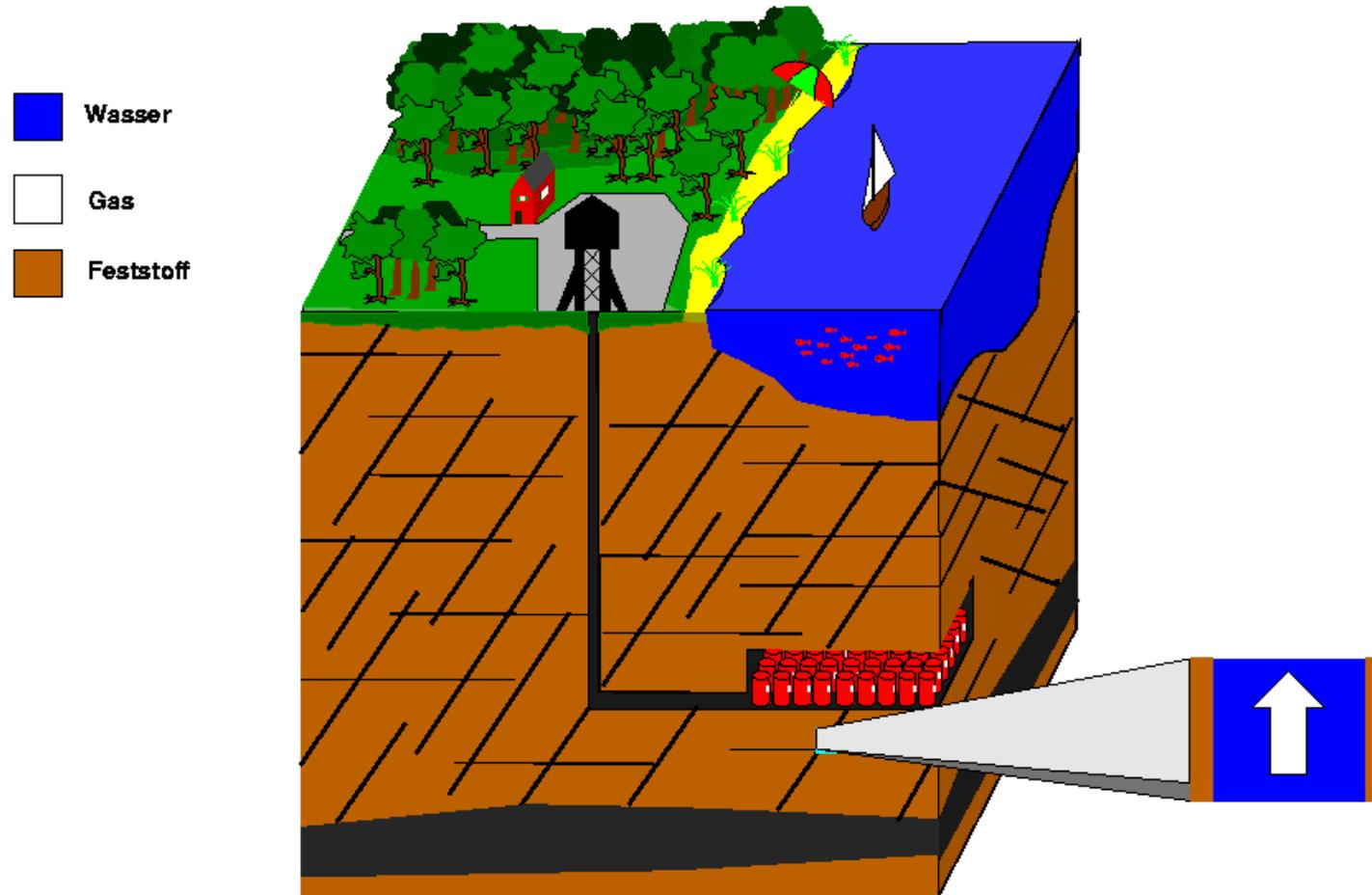
Entgasungsprozesse in der Nähe von Endlagern



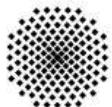
Gas löst sich in tiefen geologischen Formationen



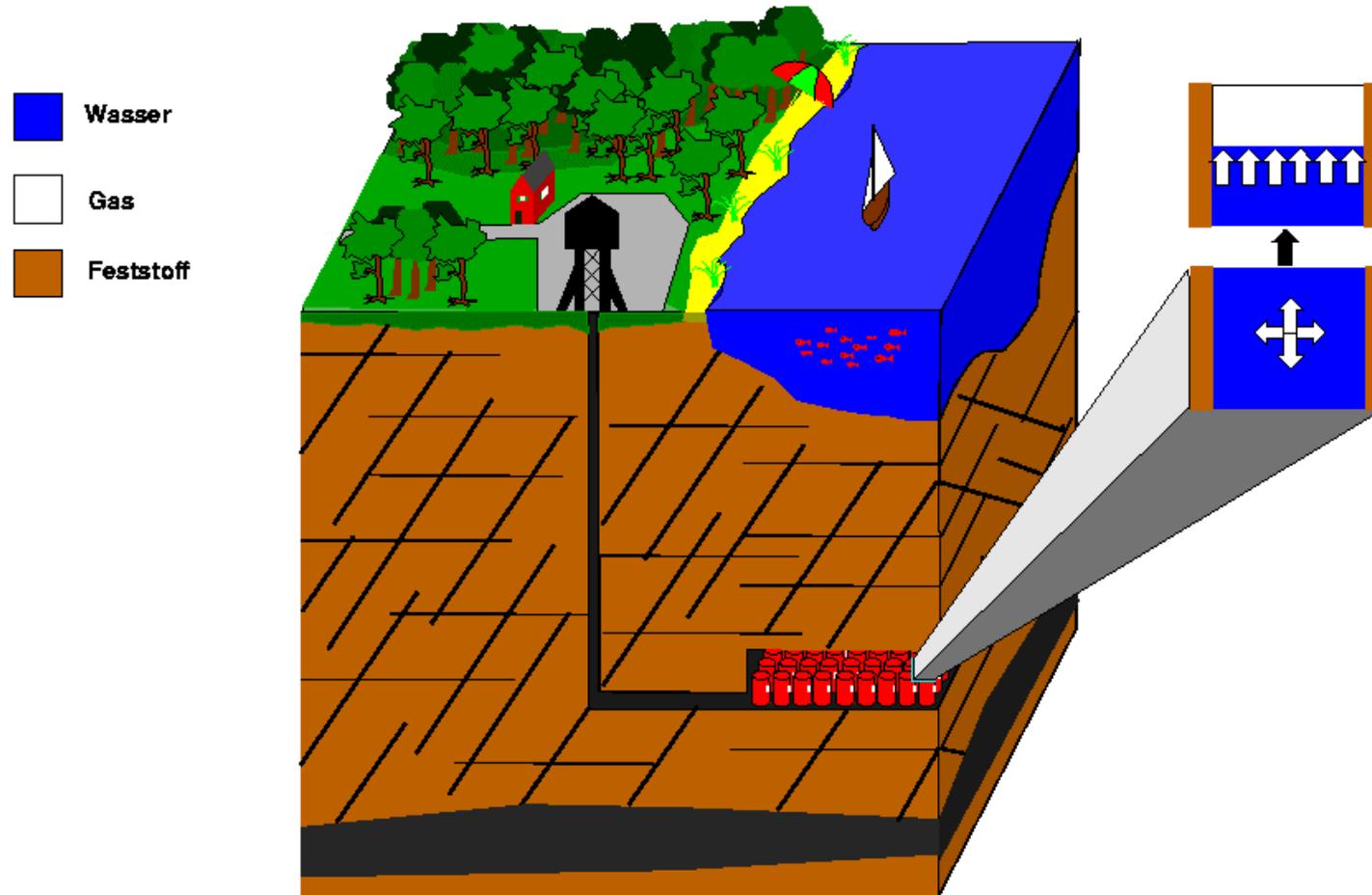
Entgasungsprozesse in der Nähe von Endlagern



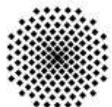
Transport der Gaskomponente in der Wasserphase



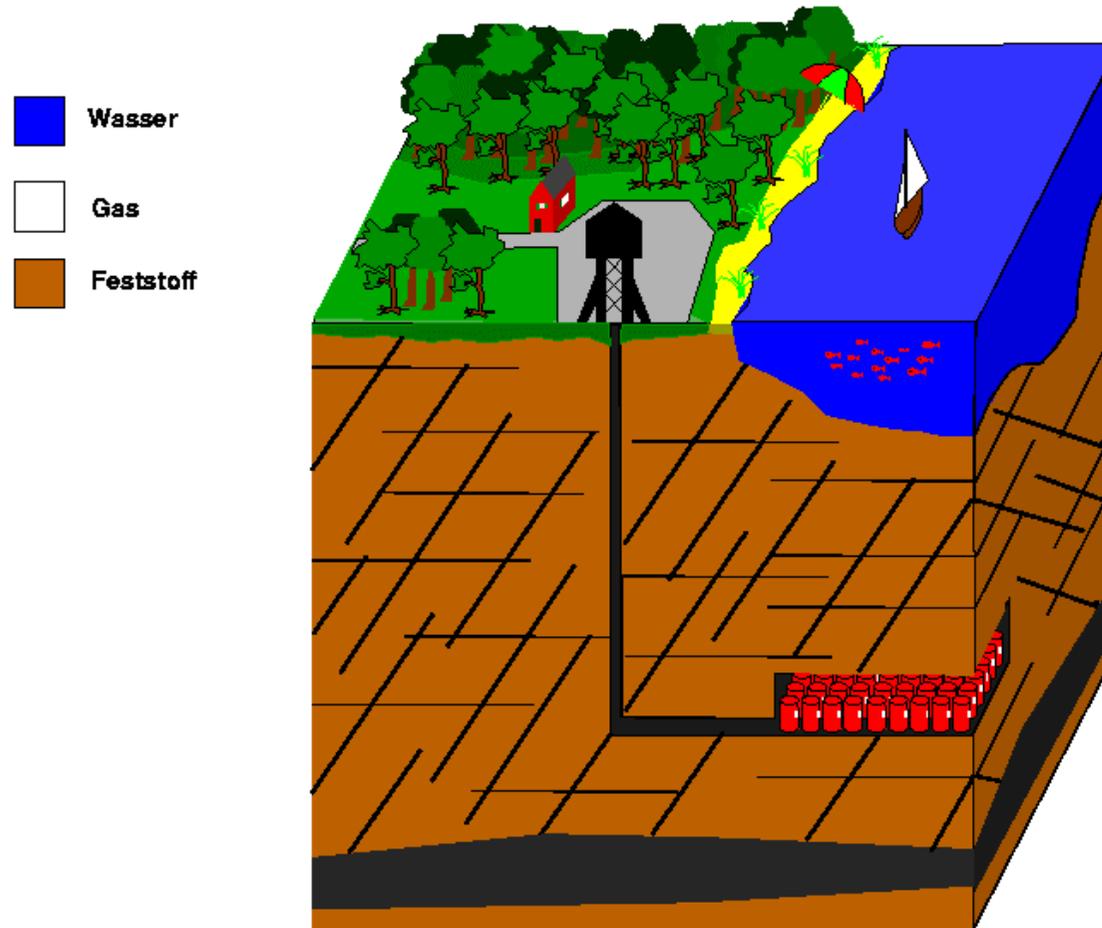
Entgasungsprozesse in der Nähe von Endlagern



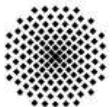
Entgasung in der Nähe von tief gelegenen Lagern



Entgasungsprozesse in der Nähe von Endlagern

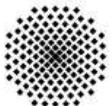


Druckabfall in den Kluftsystemen nahe des Tunnels

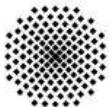
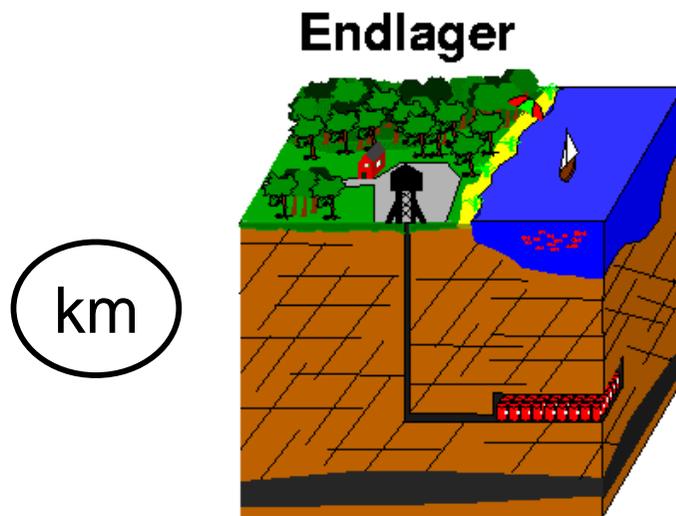


Gliederung des Vortrags

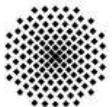
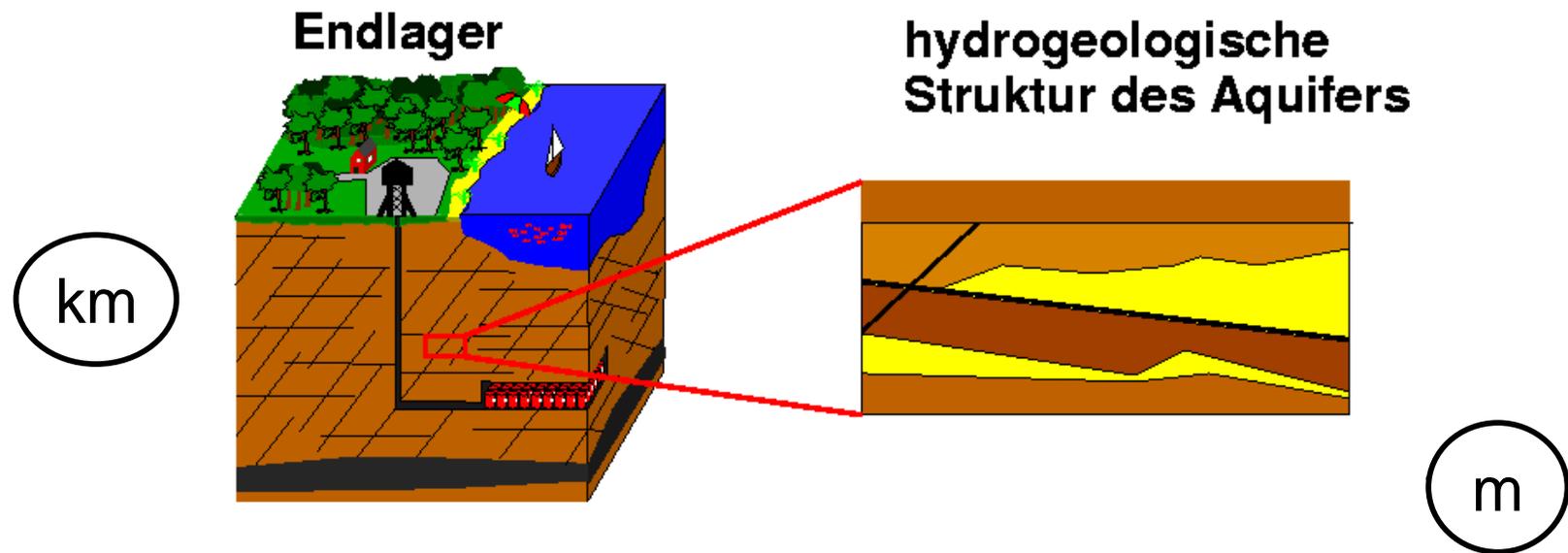
1. Entgasung in der Nähe von Endlagern
2. Einordnung des Problems
3. Erfassung der Entgasung auf der Mikroskala
4. Upscaling der Parameter auf die Makroskala
5. Homogenisierung mittels Renormalisierung
6. Erfassung der Entgasung auf der Makroskala
7. Zusammenfassung und Ausblick



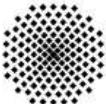
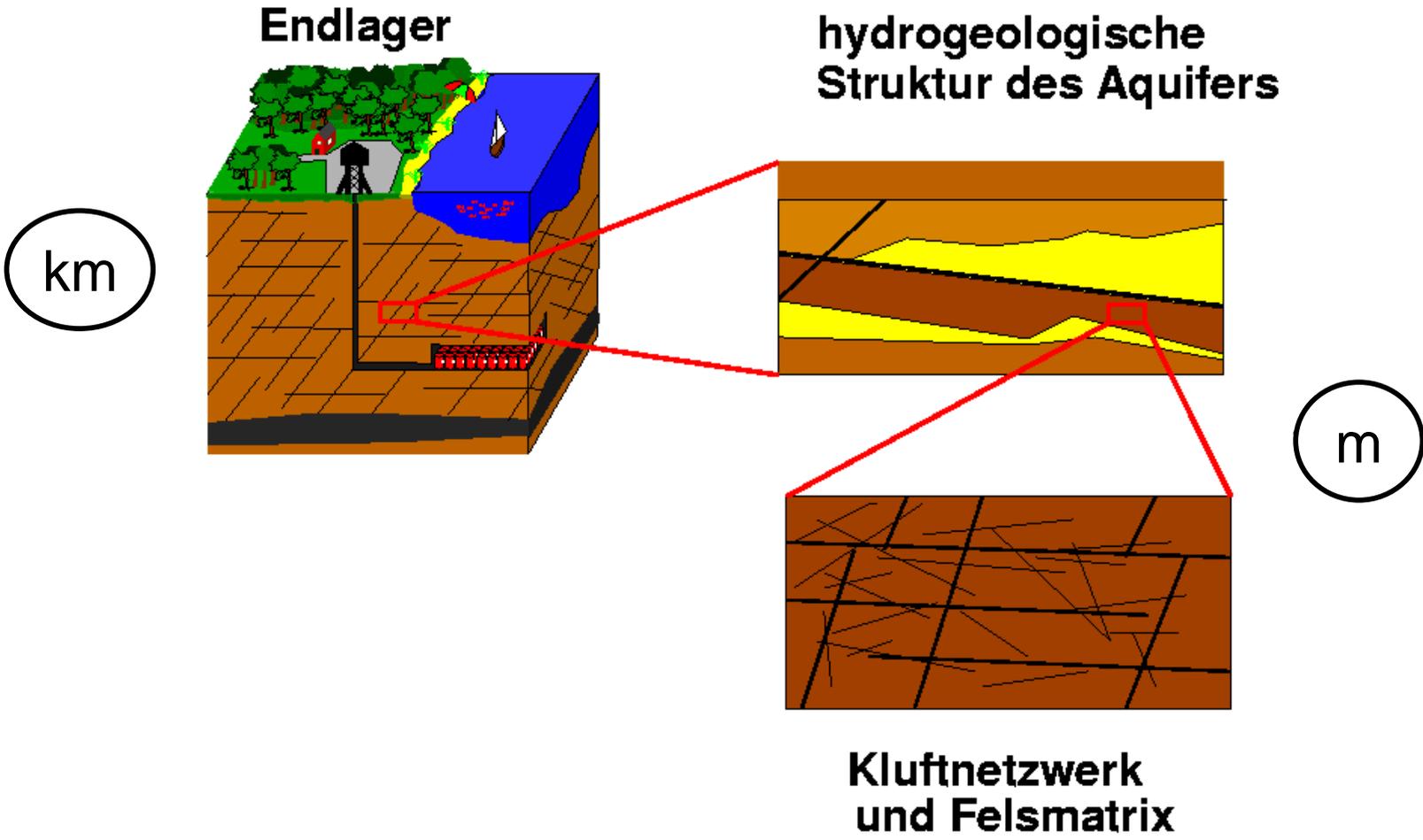
Räumliche Skala



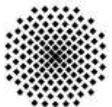
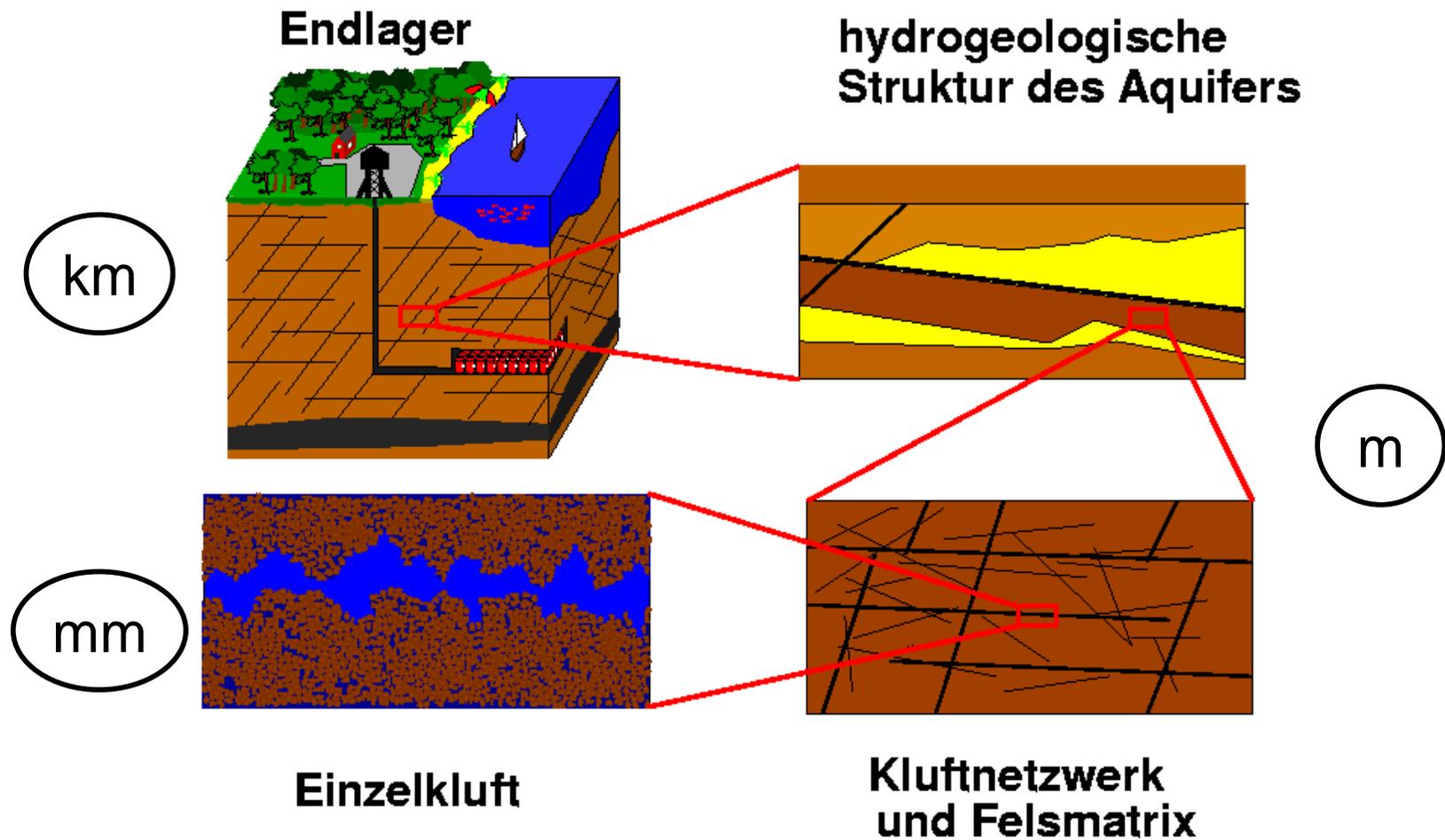
Räumliche Skala



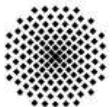
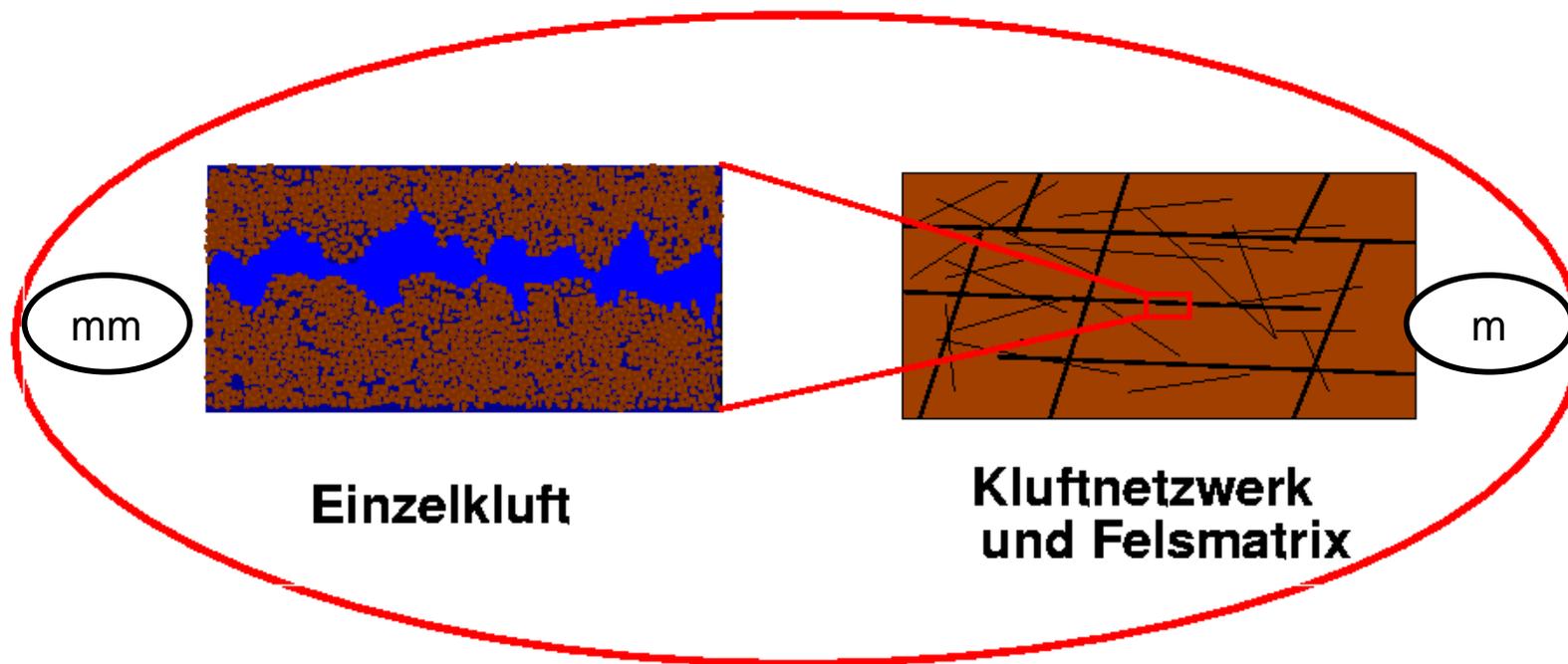
Räumliche Skala



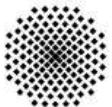
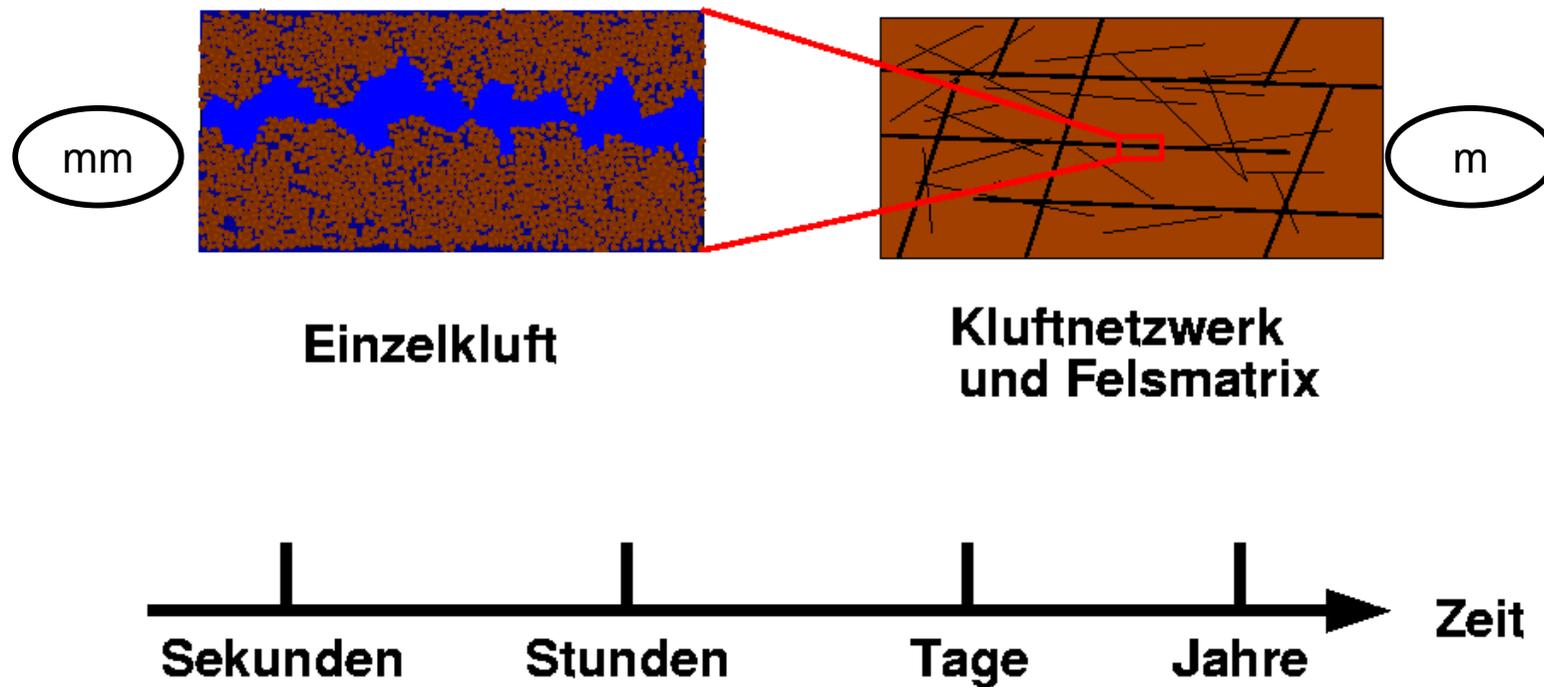
Räumliche Skala



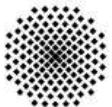
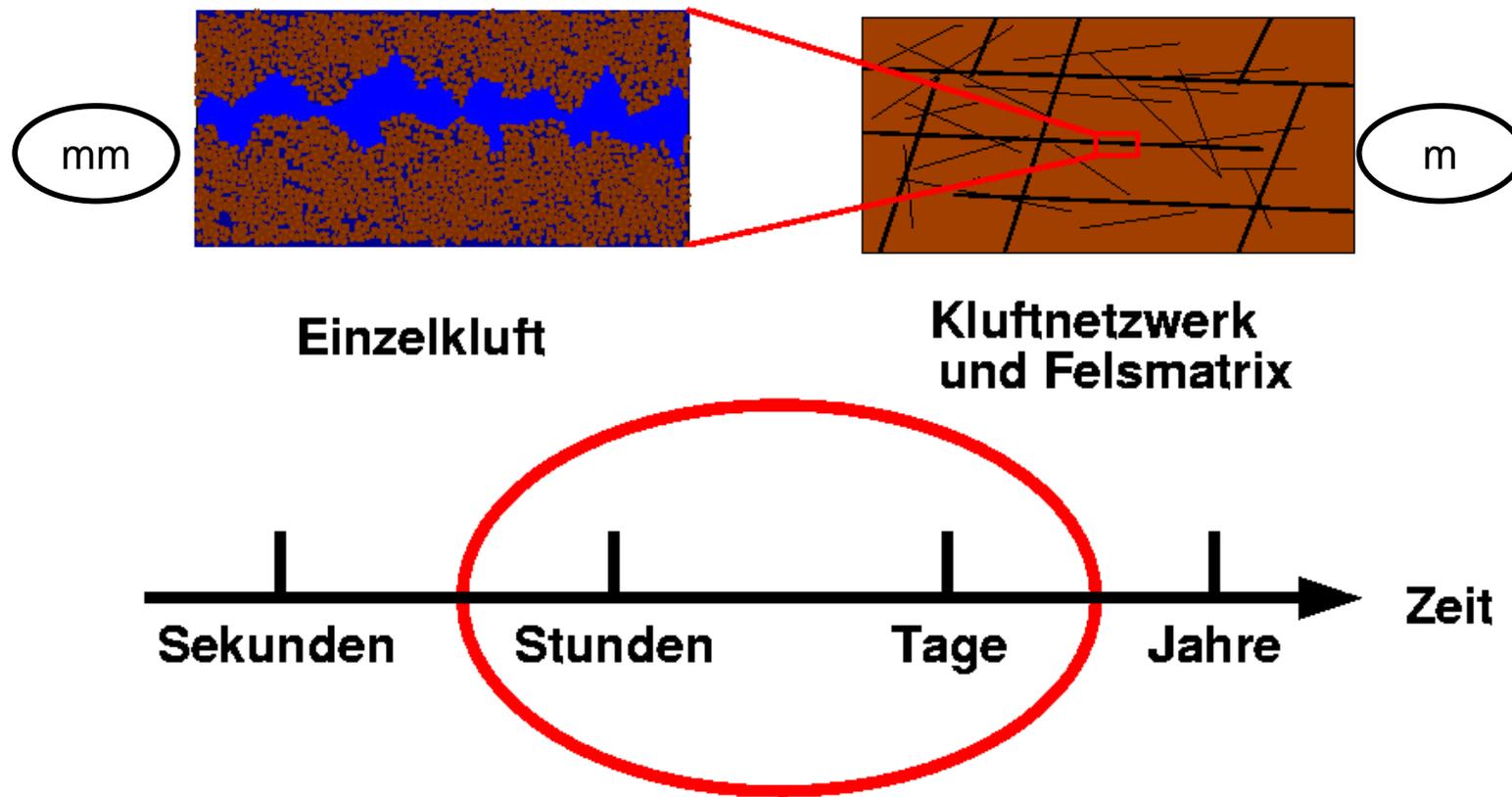
Räumliche Skala



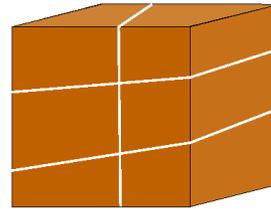
Räumliche und zeitliche Skala



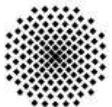
Räumliche und zeitliche Skala



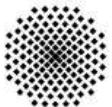
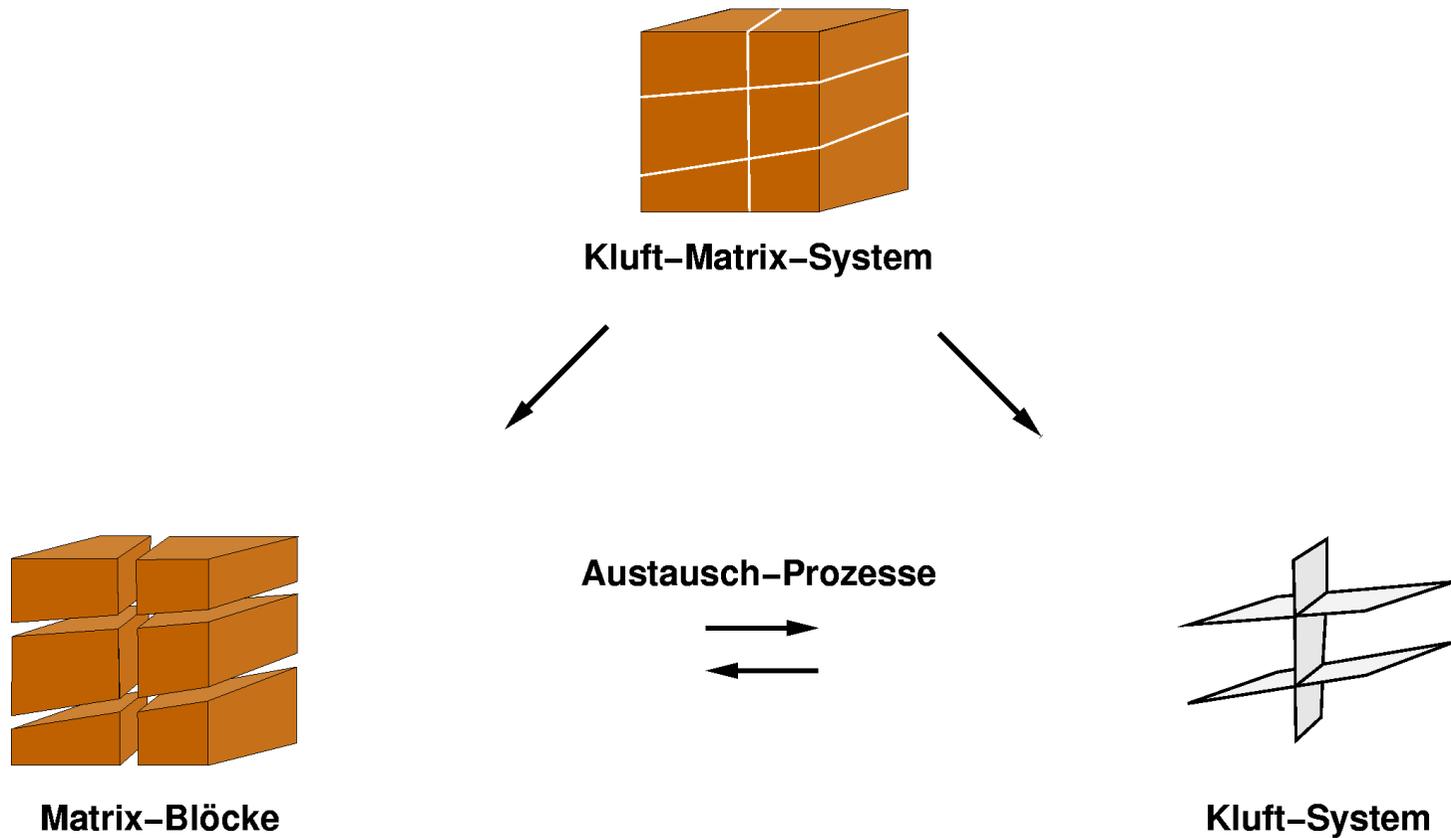
Kluft-Matrix-System



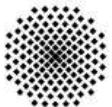
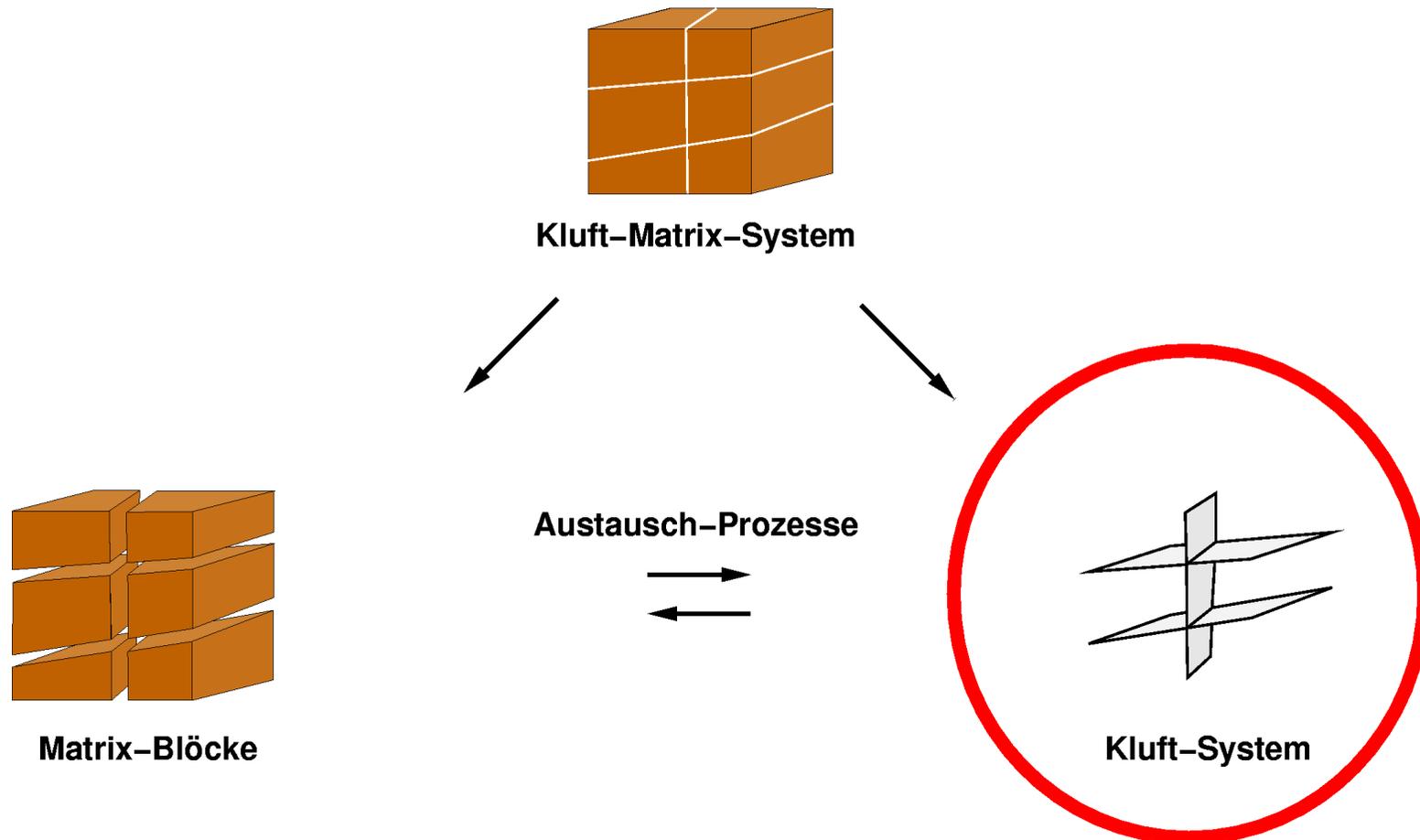
Kluft-Matrix-System



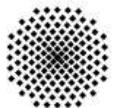
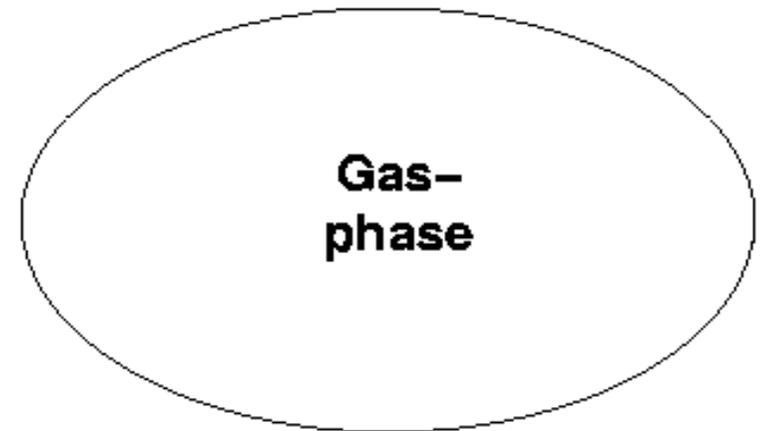
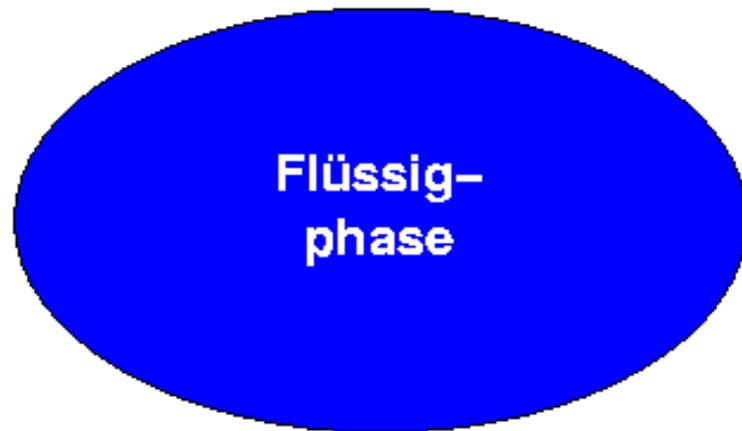
Kluft-Matrix-System



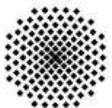
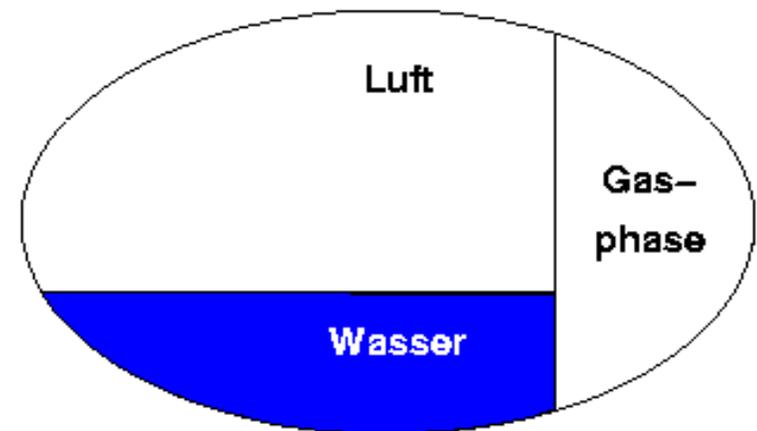
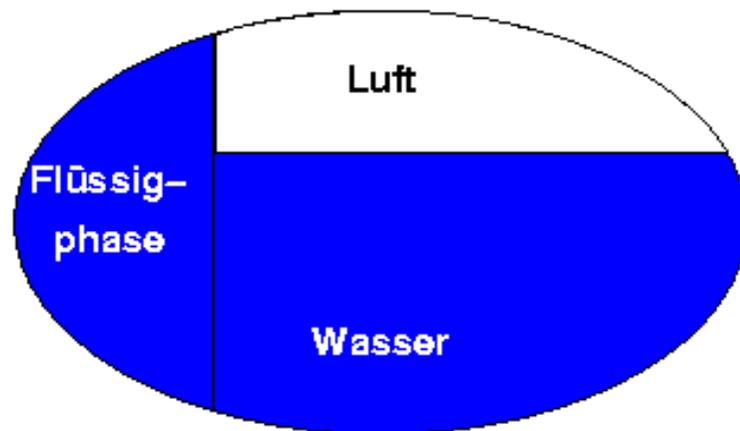
Kluft-Matrix-System



Betrachtung der Prozesse



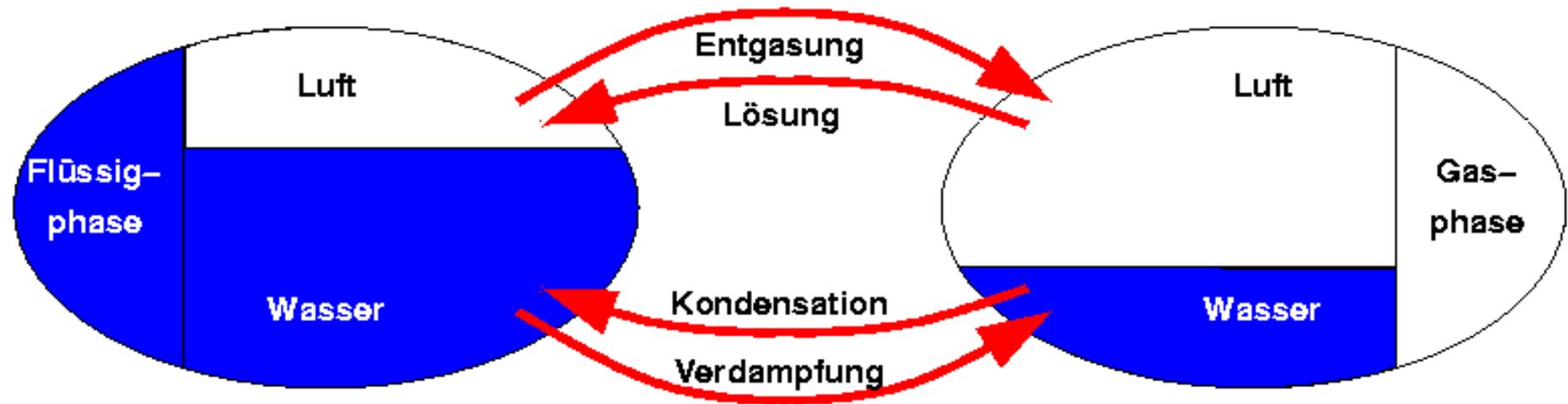
Betrachtung der Prozesse



Massentransferprozesse

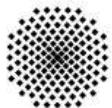
$$p_g^a = x_g^a \cdot p_g$$

$$p_l^a = x_l^a \cdot H^a$$

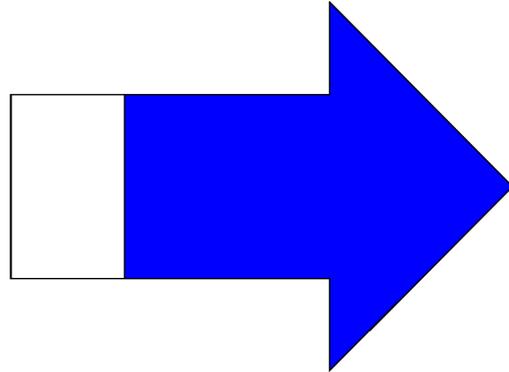


$$p_g^w = x_g^w \cdot p_g$$

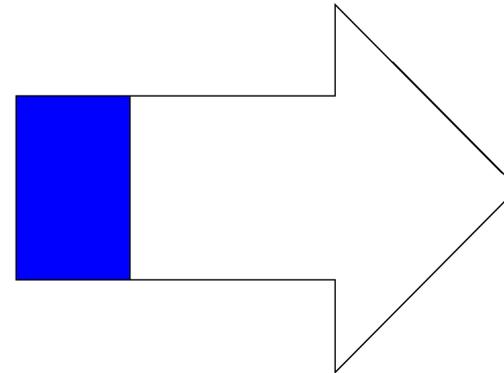
$$p_g^w = x_l^w \cdot p_{\text{sat}}^w$$



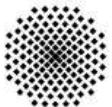
Zwei-Phasen-Strömungs-Prozesse



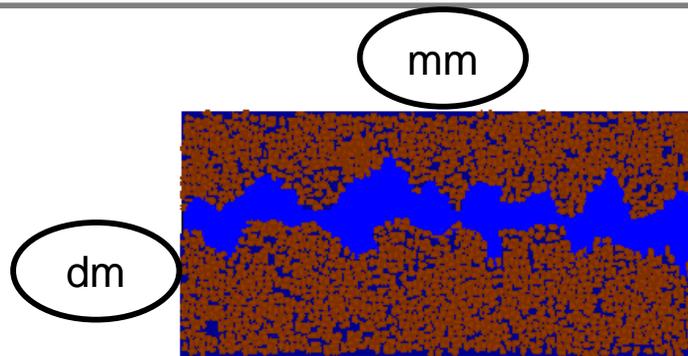
Wasserphase



Gasphase

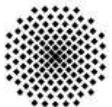


Vorgehen

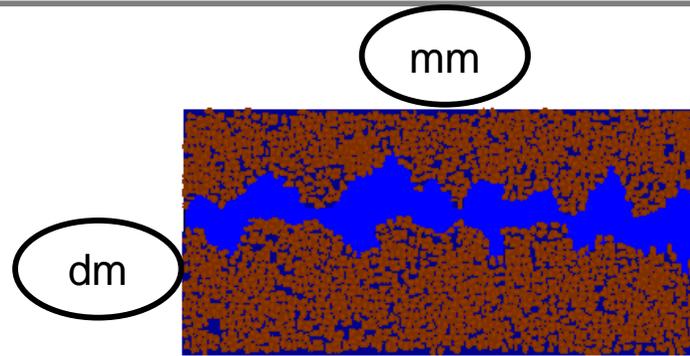


$$\mathbf{p}, \mathbf{T}, \mathbf{V}_w, \mathbf{V}_g, \mathbf{p}_{\text{sat}}^w, \mathbf{H}^a(\mathbf{T})$$

Mikroskala

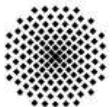
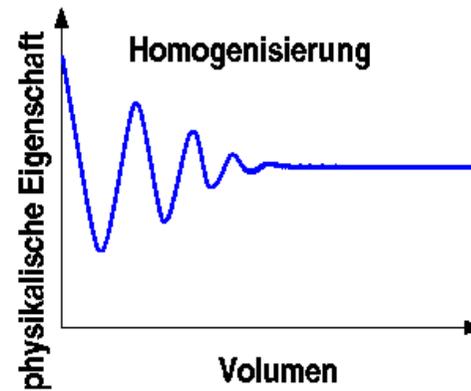


Vorgehen

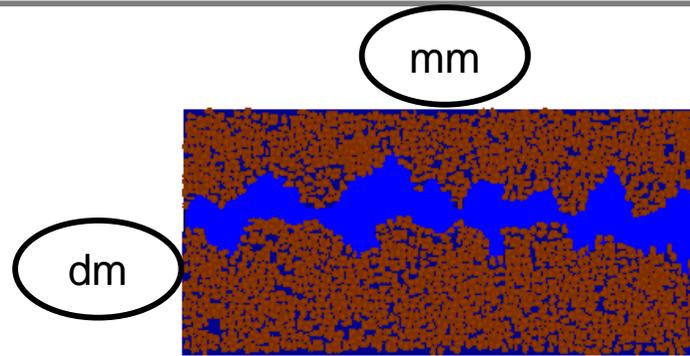


Mikroskala

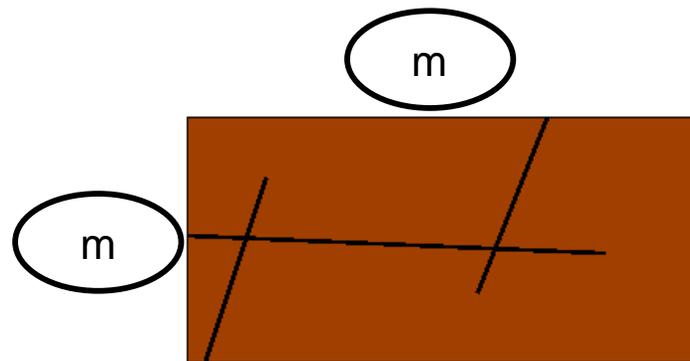
$$\mathbf{p, T, V_w, V_g, p_{sat}^w, H^a(T)}$$



Vorgehen

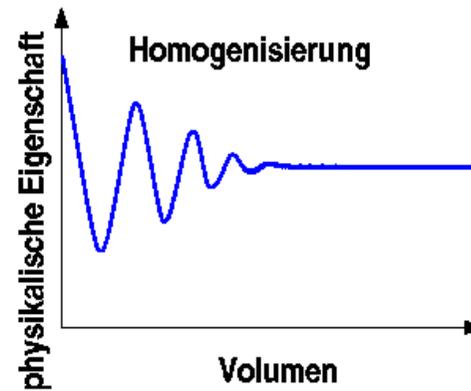


Mikroskala

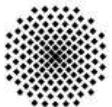


Makroskala

$$p, T, V_w, V_g, p_{\text{sat}}^w, H^a(T)$$

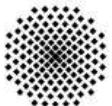


$$p, T, S_w, S_g, k_{rw}, p_c$$



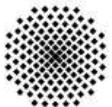
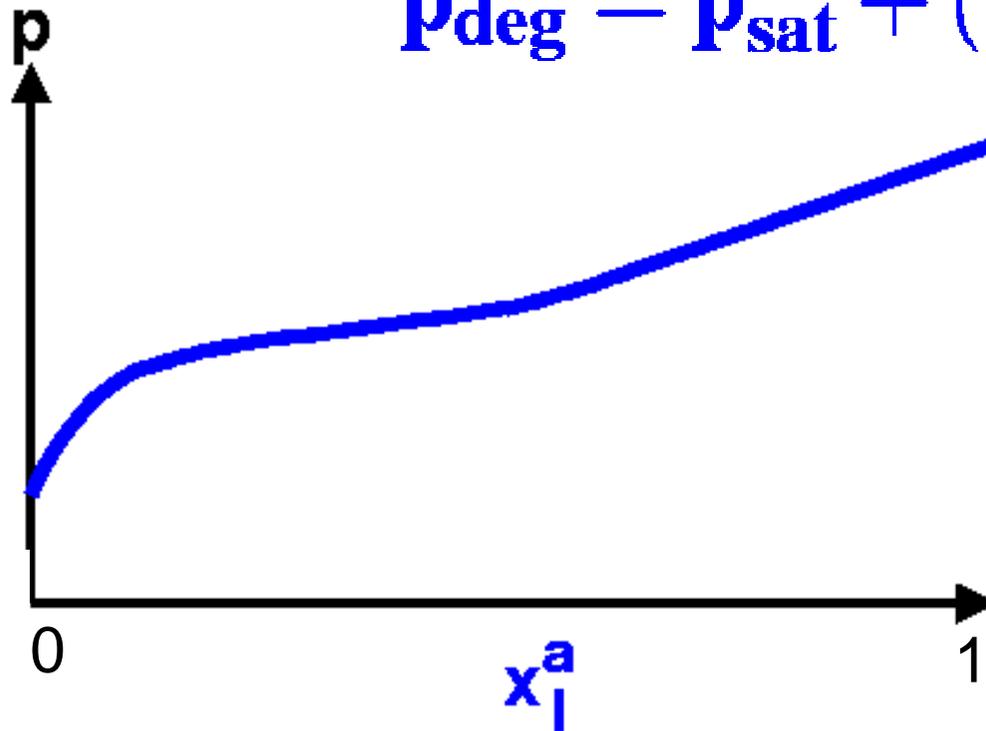
Gliederung des Vortrags

1. Entgasung in der Nähe von Endlagern
2. Einordnung des Problems
3. Erfassung der Entgasung auf der Mikroskala
4. Upscaling der Parameter auf die Makroskala
5. Homogenisierung mittels Renormalisierung
6. Erfassung der Entgasung auf der Makroskala
7. Zusammenfassung und Ausblick



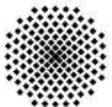
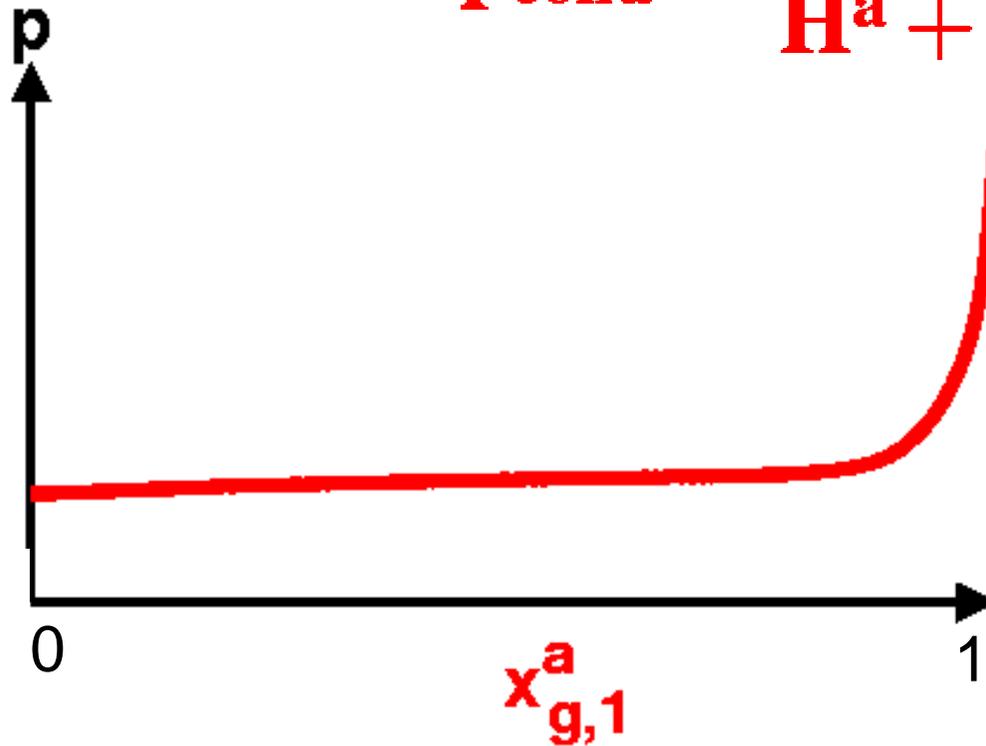
Entgasung bei Druckabfall

$$p_{\text{deg}} = p_{\text{sat}}^w + (H^a - p_{\text{sat}}^w) x_1^a$$

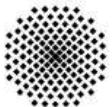
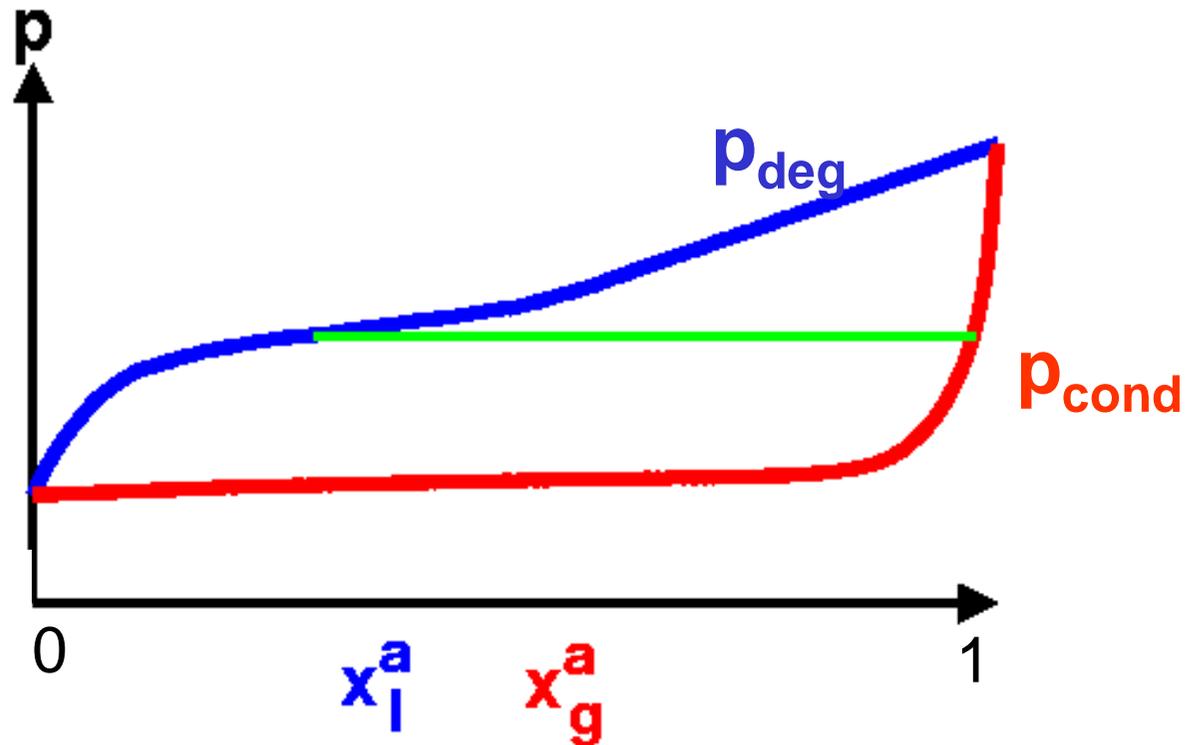


Entgasung bei Druckabfall

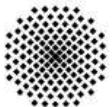
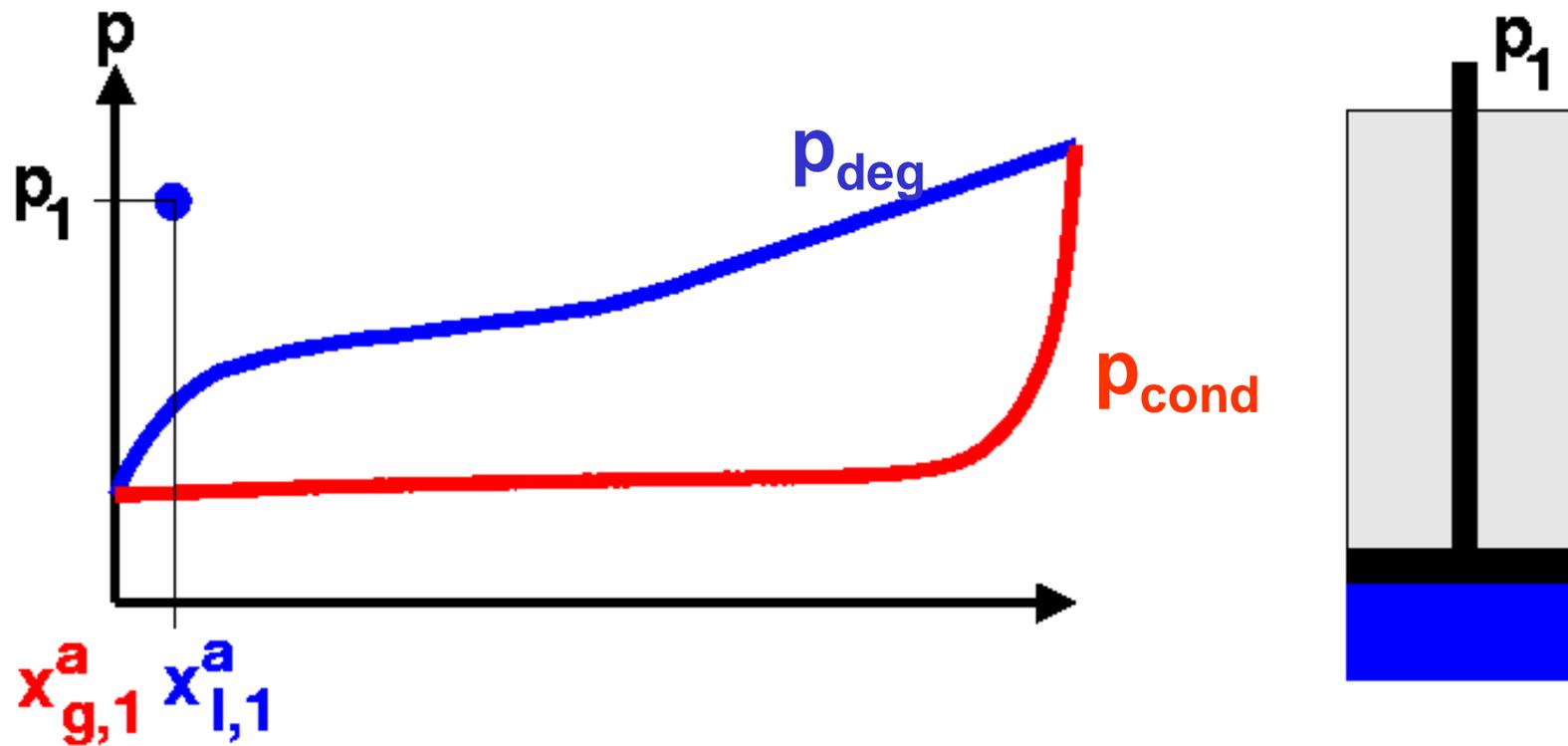
$$p_{\text{cond}} = \frac{H^a p_{\text{sat}}^w}{H^a + (p_{\text{sat}}^w - H^a) x_{g,1}^a}$$



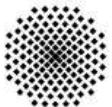
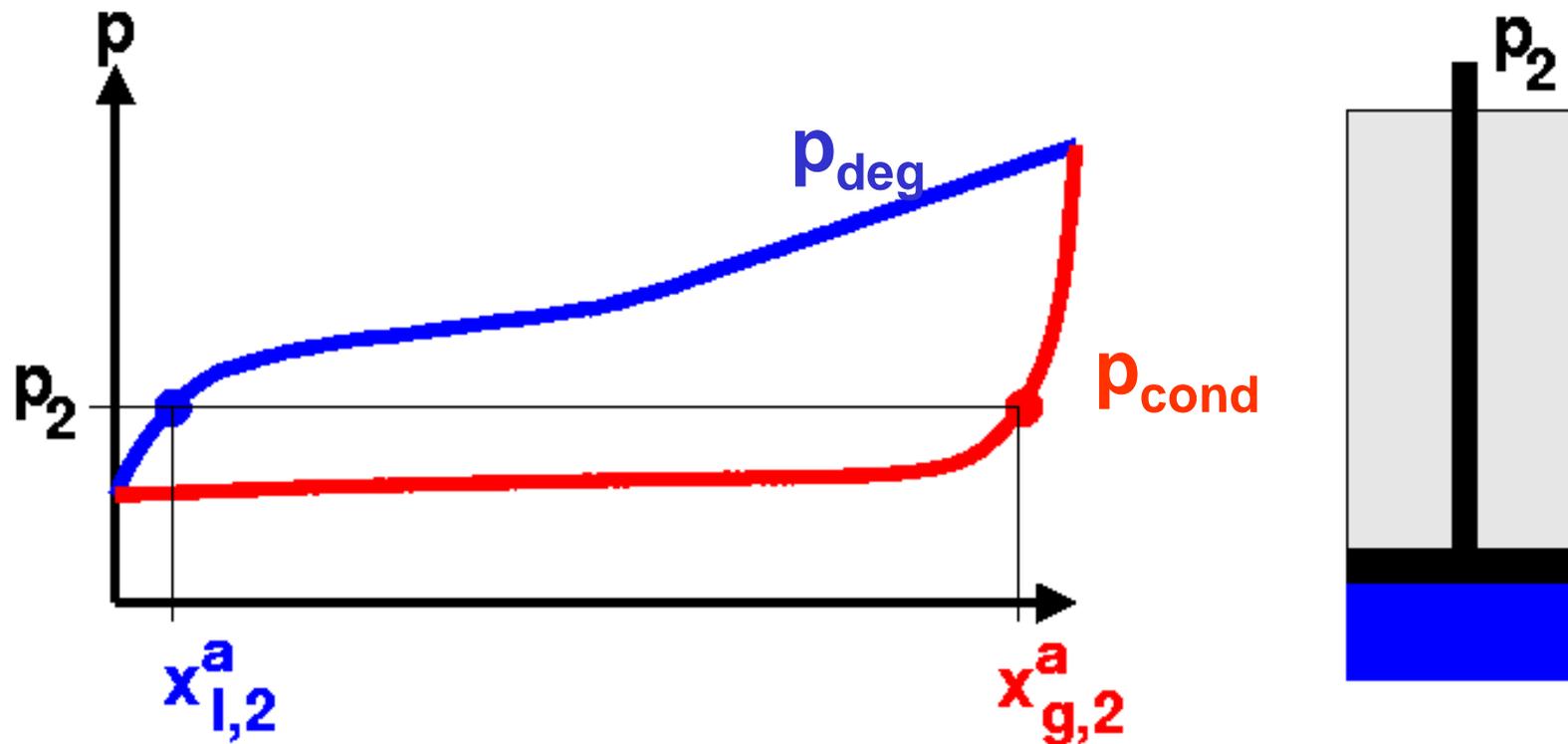
Entgasung bei Druckabfall



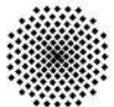
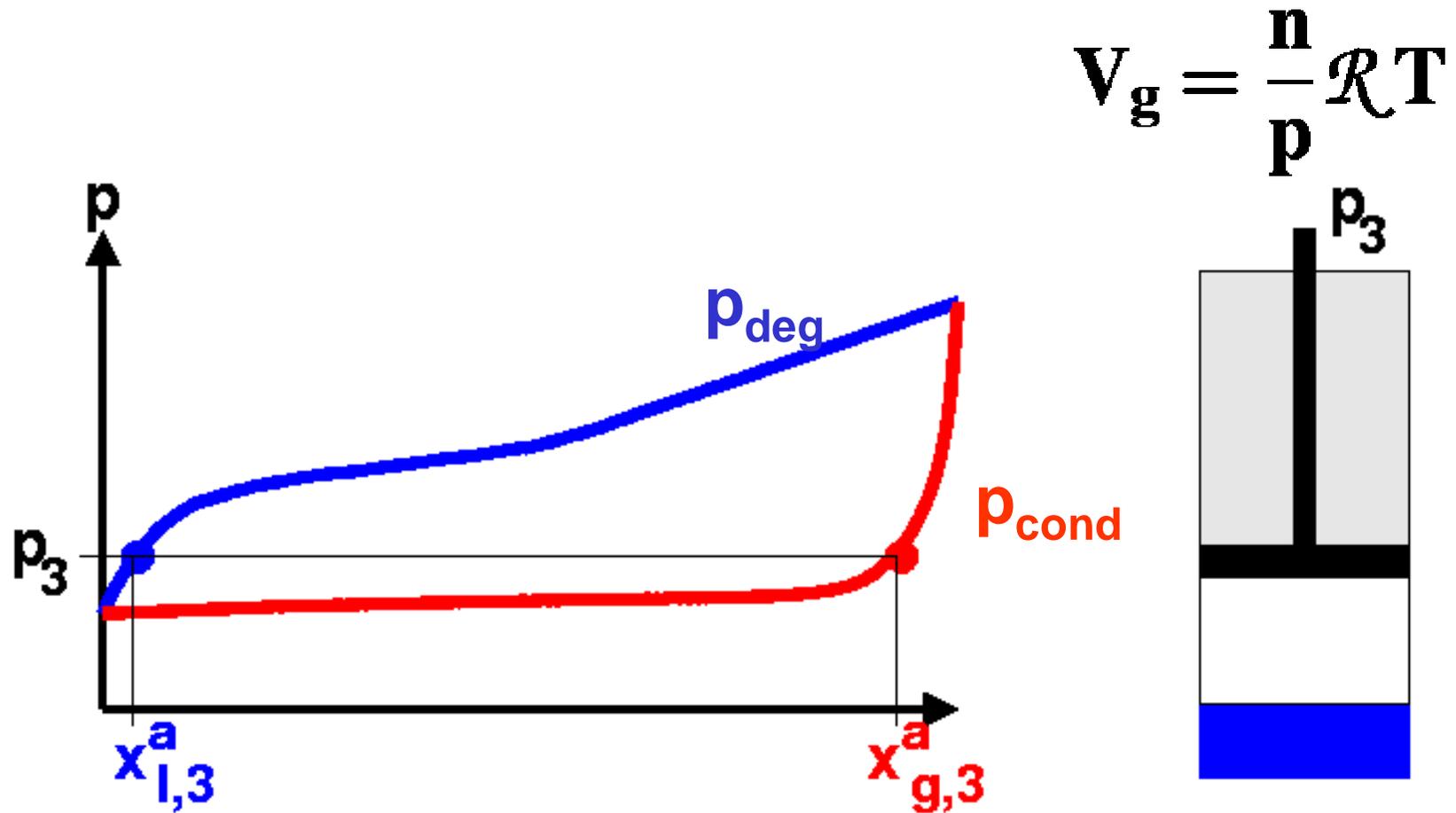
Entgasung bei Druckabfall



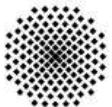
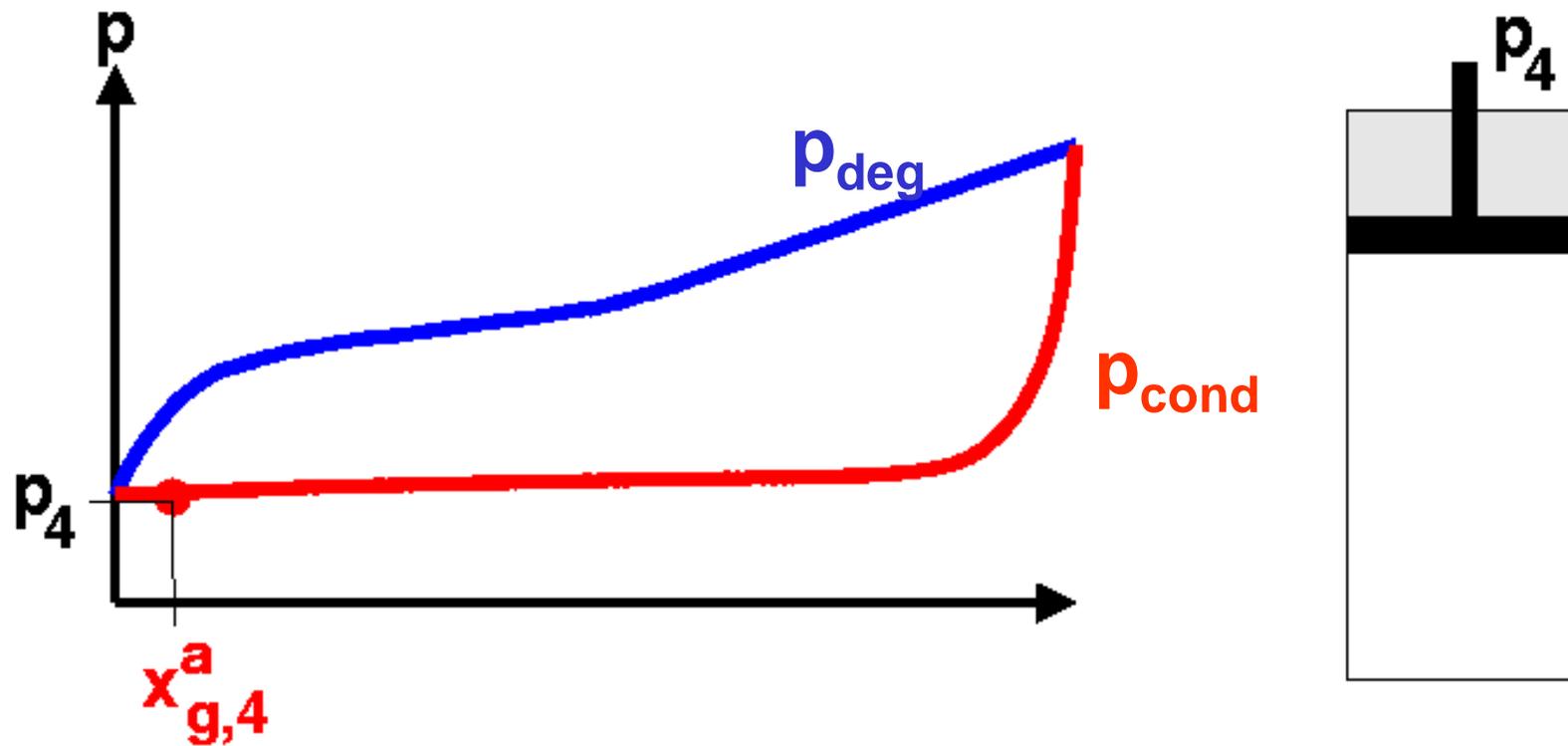
Entgasung bei Druckabfall



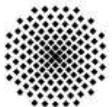
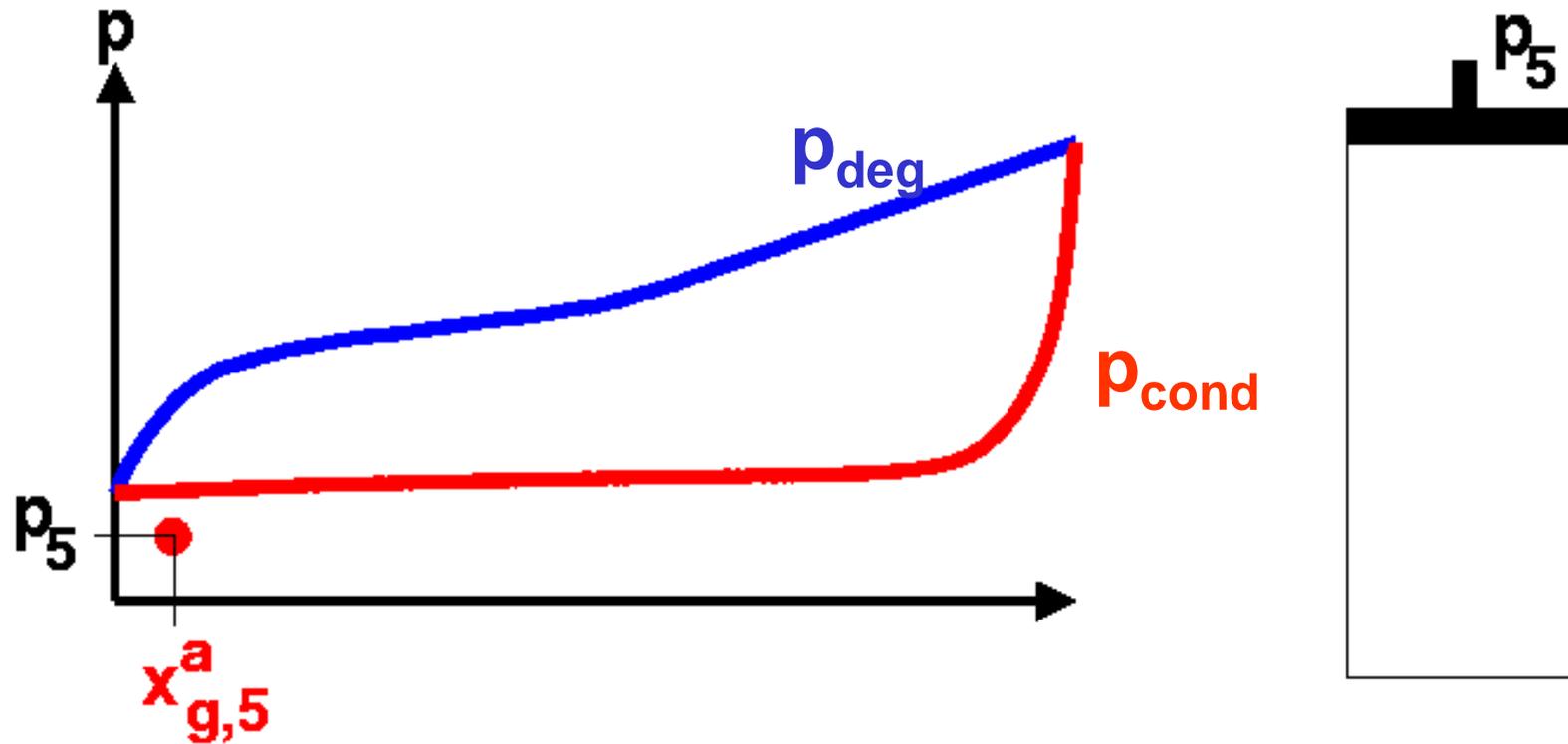
Entgasung bei Druckabfall



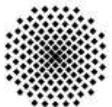
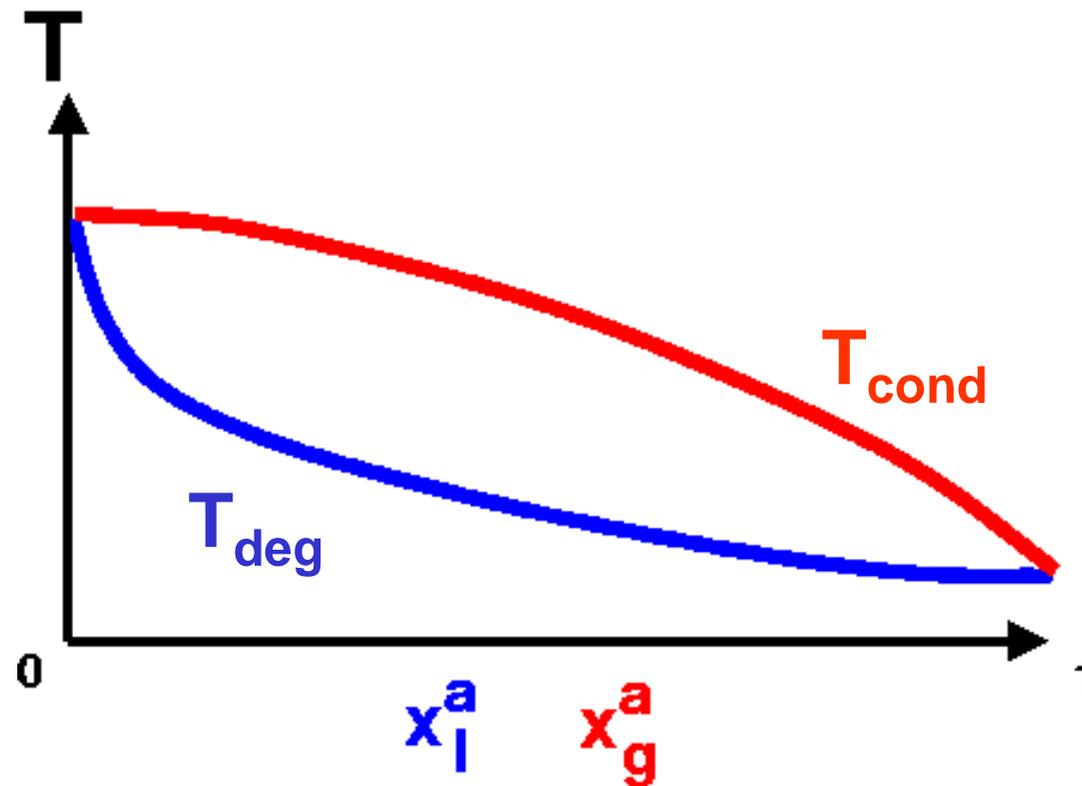
Entgasung bei Druckabfall



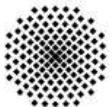
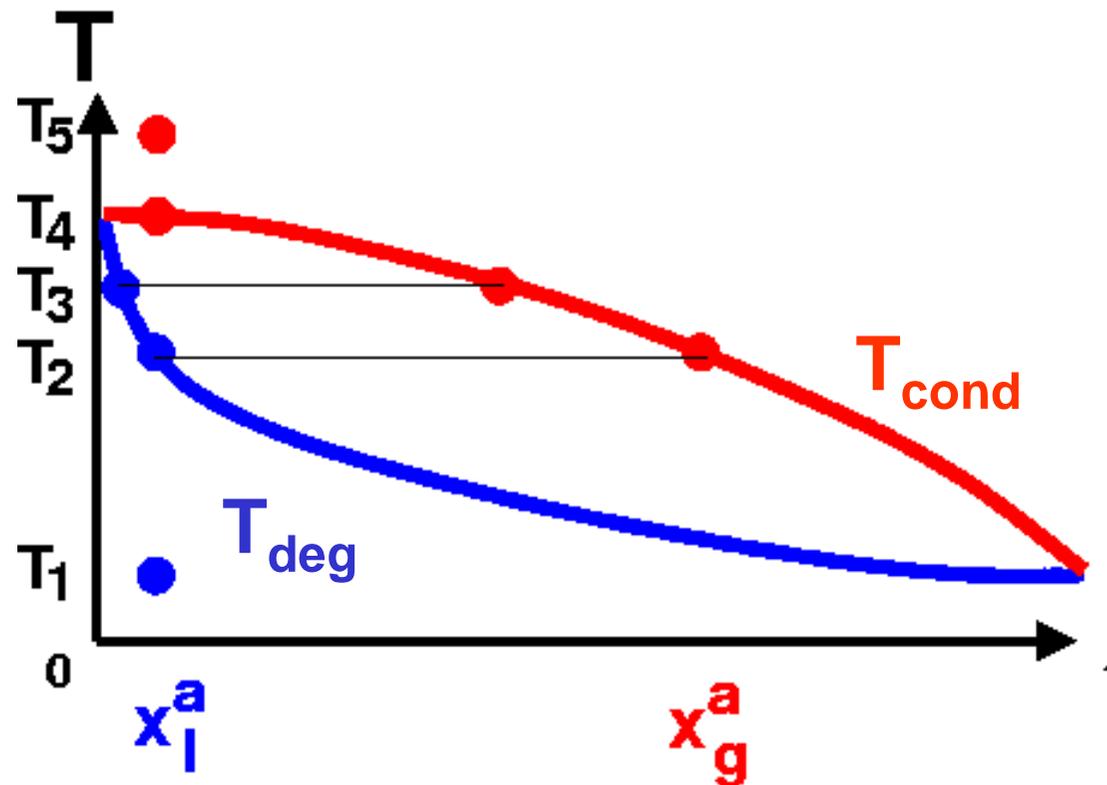
Entgasung bei Druckabfall



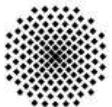
Entgasung bei Temperaturanstieg



Entgasung bei Temperaturanstieg

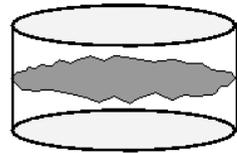


Wie verhält sich der
Entgasungsprozess in der
Einzelkluft?



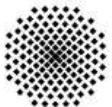
Experiment auf der Mikroskala

 **Digitalkamera**

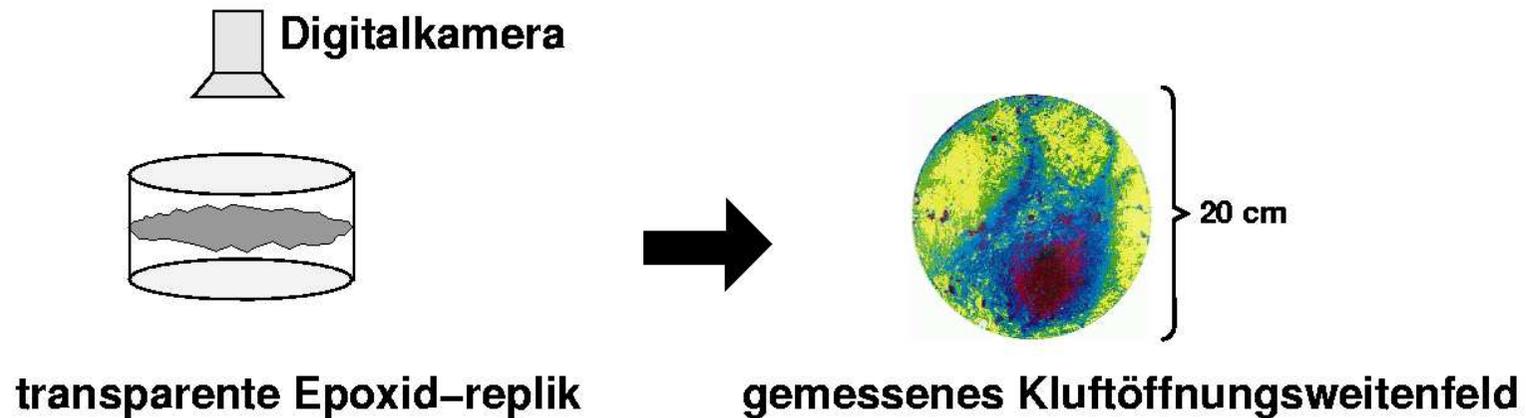


transparente Epoxid-replik

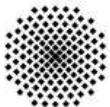
(J. Jarsjö, G. Destouni, SKB Progress Report, 2000)



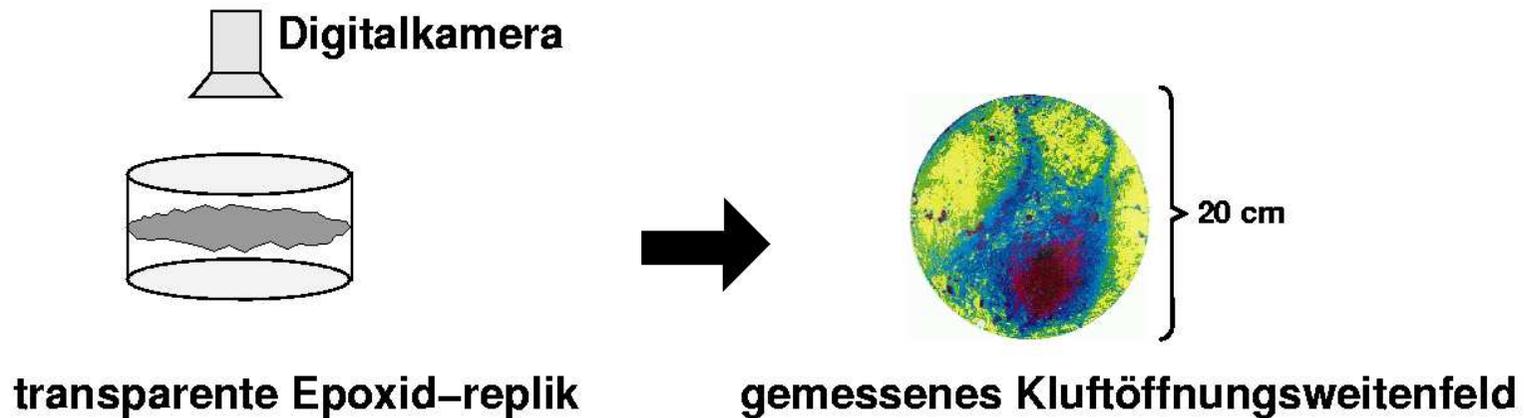
Experiment auf der Mikroskala



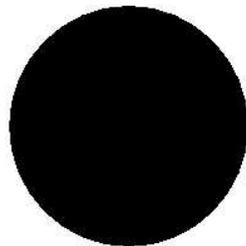
(J. Jarsjö, G. Destouni, SKB Progress Report, 2000)



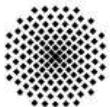
Experiment auf der Mikroskala



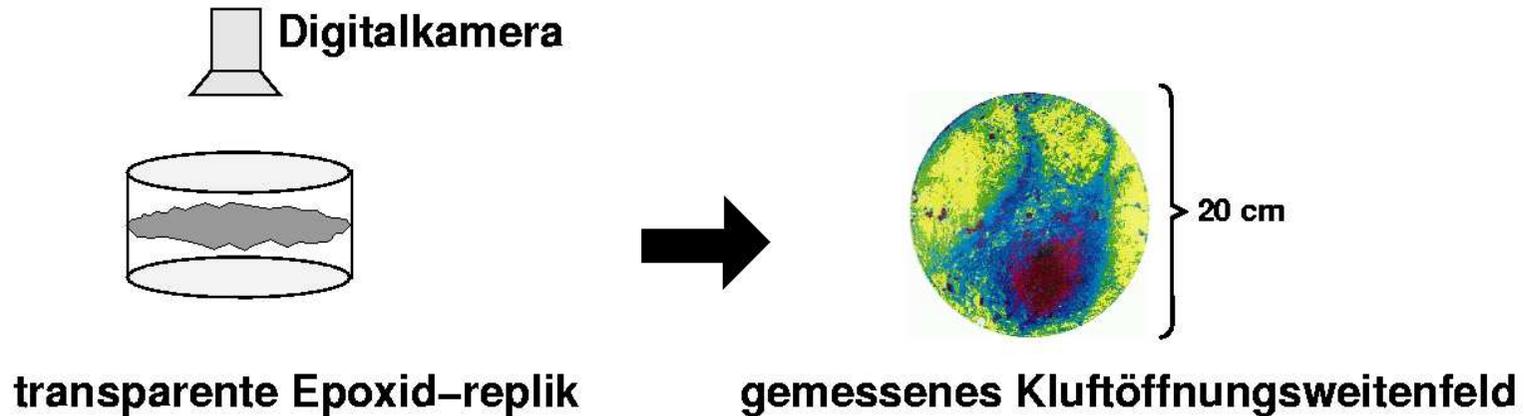
$$p > p_{deg}$$



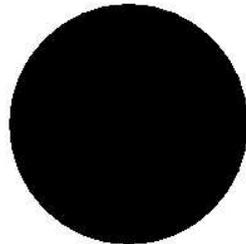
(J. Jarsjö, G. Destouni, SKB Progress Report, 2000)



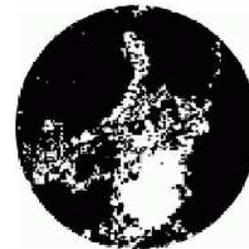
Experiment auf der Mikroskala



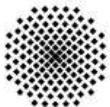
$p > p_{deg}$



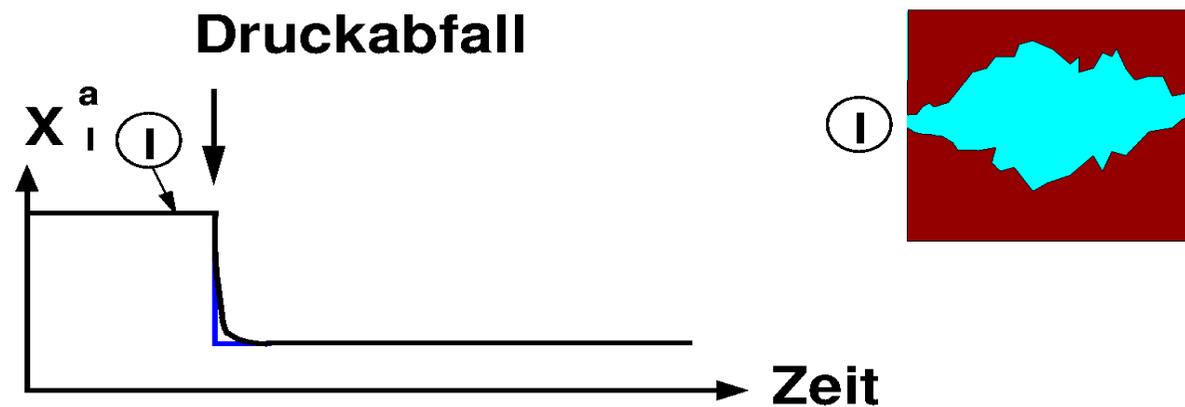
$p < p_{deg}$



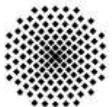
(J. Jarsjö, G. Destouni, SKB Progress Report, 2000)



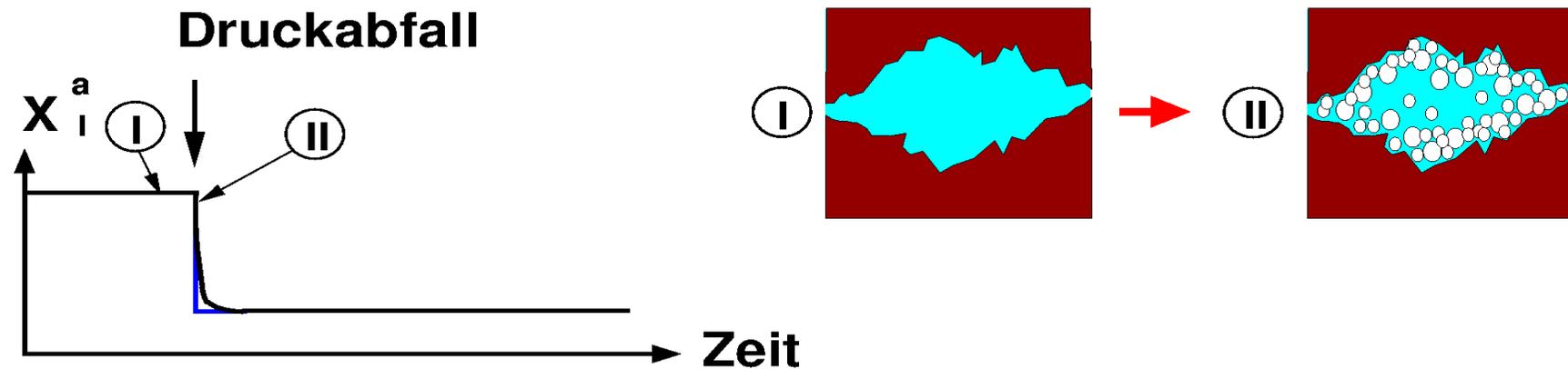
Prozessablauf auf der Mikroskala



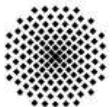
$$p > p_{deg}$$



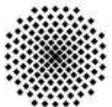
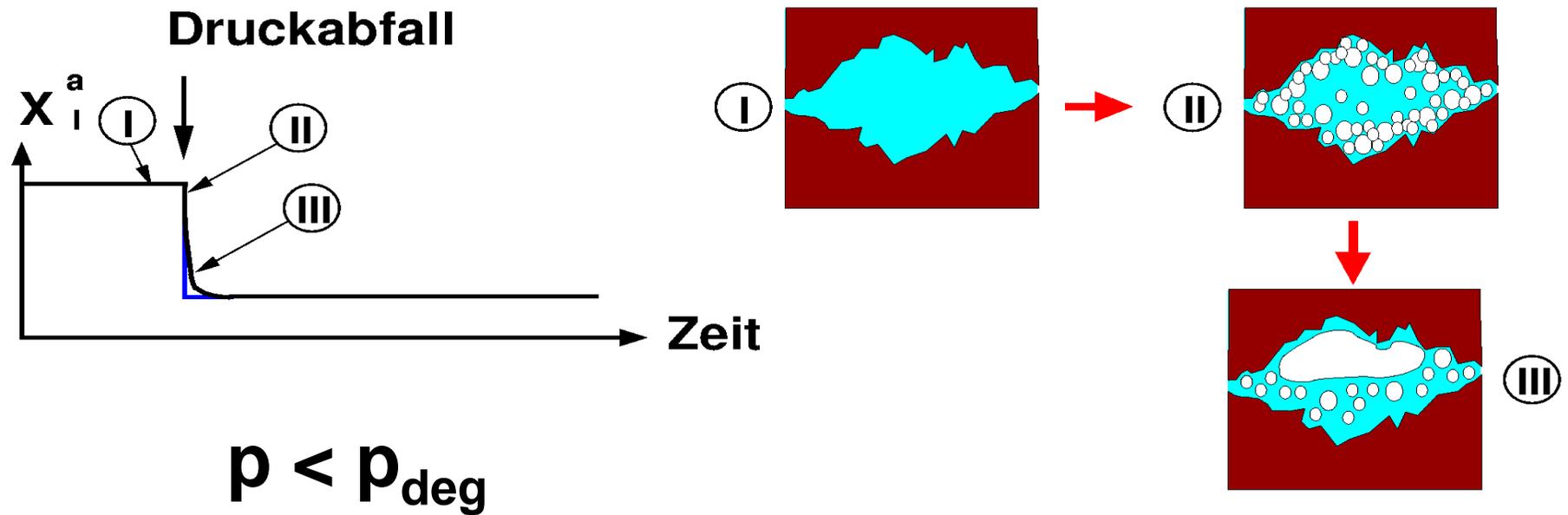
Prozessablauf auf der Mikroskala



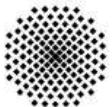
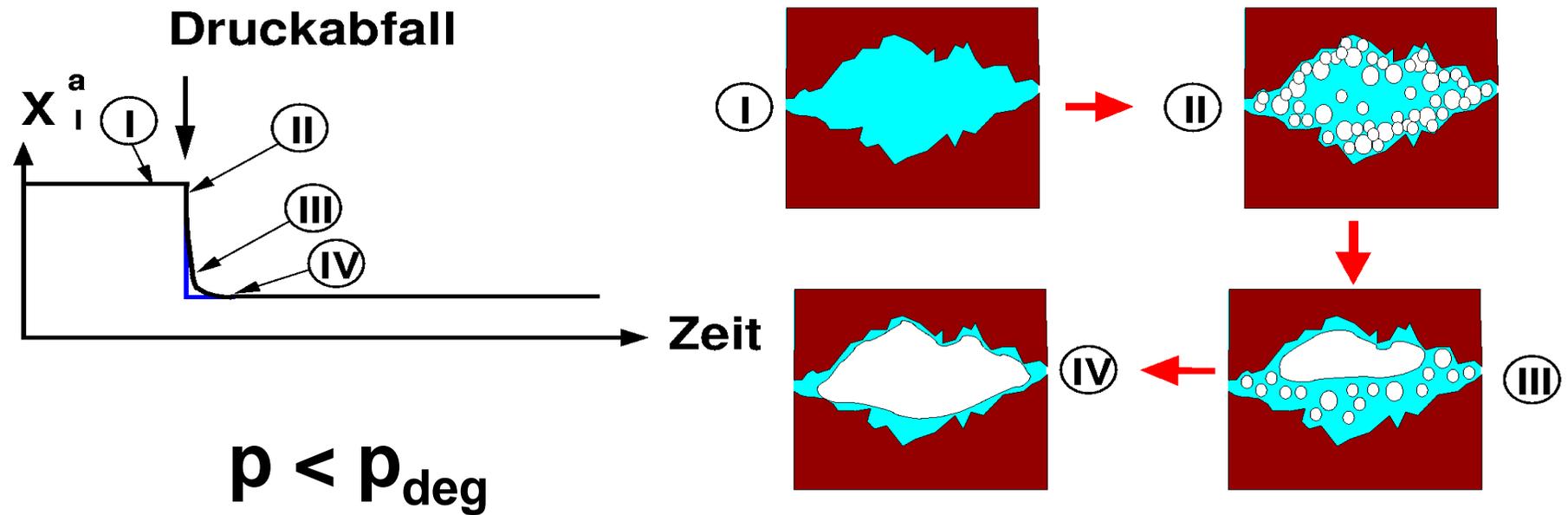
$$p < p_{deg}$$



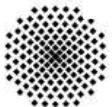
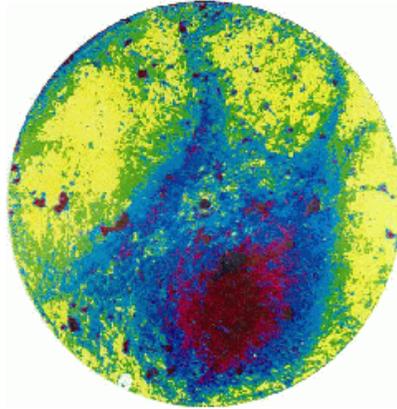
Prozessablauf auf der Mikroskala



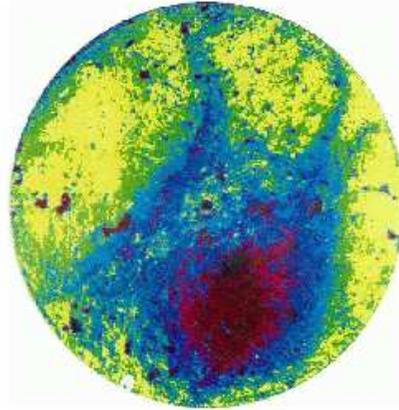
Prozessablauf auf der Mikroskala



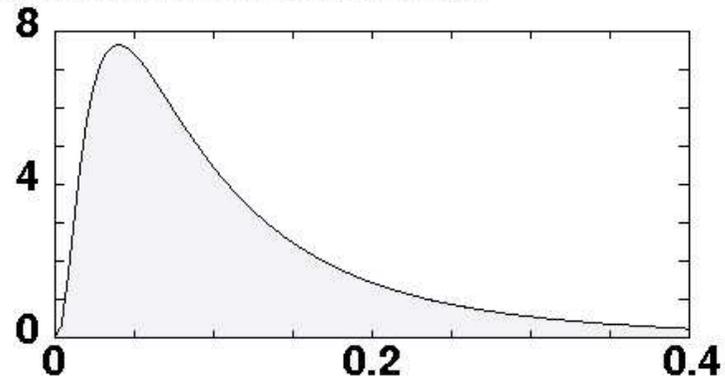
Analyse des Experiments



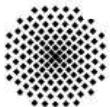
Analyse des Experiments



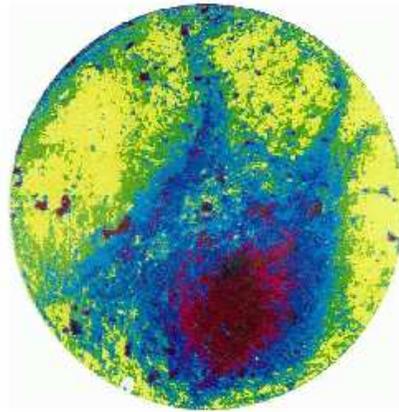
Wahrscheinlichkeitsdichte



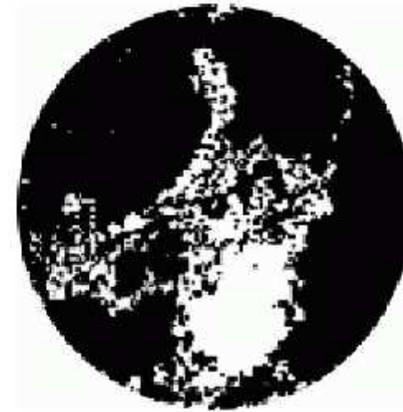
Kluftöffnungsweite a [mm]



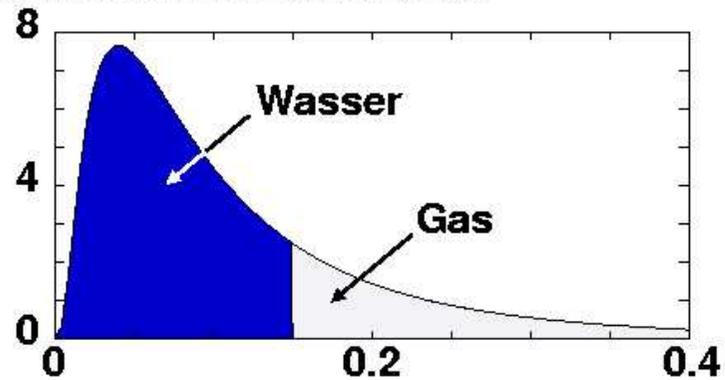
Analyse des Experiments



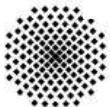
$$p < p_{deg}$$



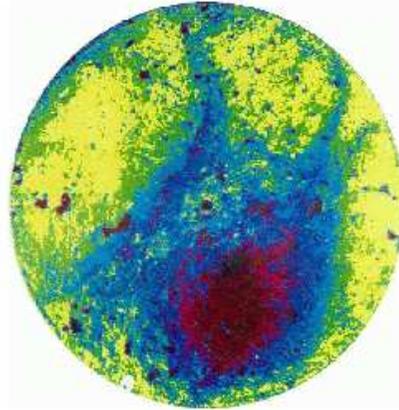
Wahrscheinlichkeitsdichte



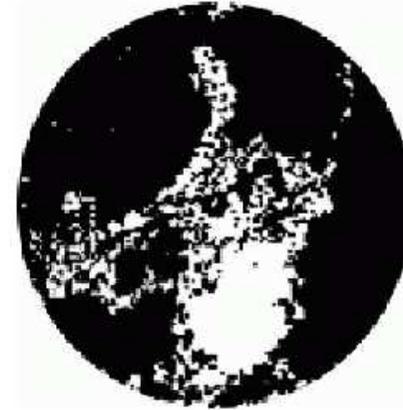
Kluftöffnungsweite a [mm]



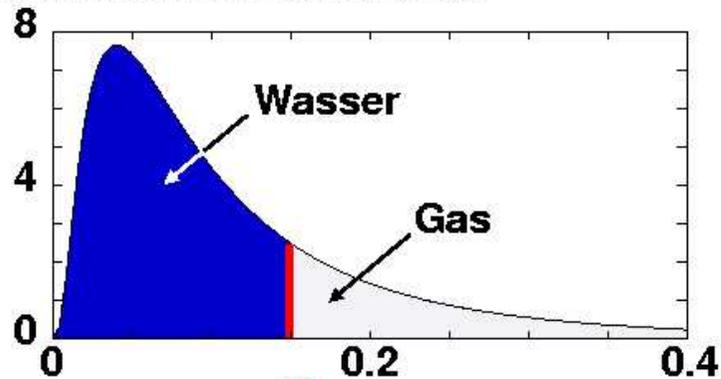
Analyse des Experiments



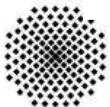
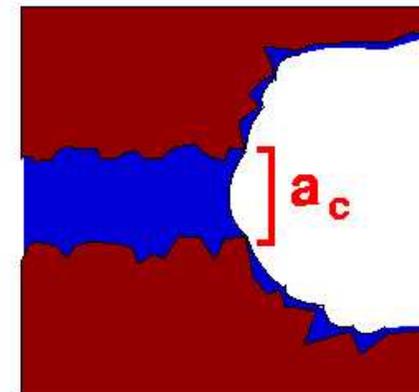
$$p < p_{deg}$$



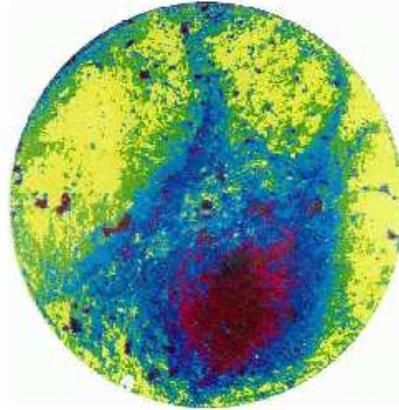
Wahrscheinlichkeitsdichte



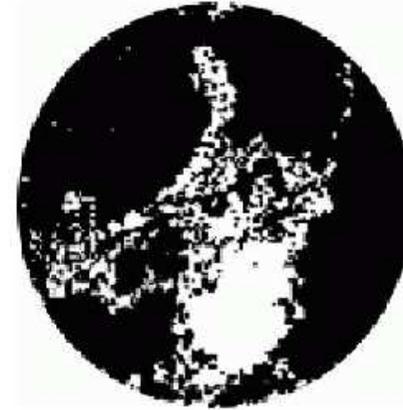
a_c
Grenz-Kluftöffnungsweite



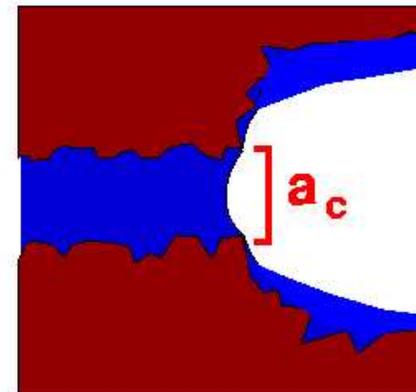
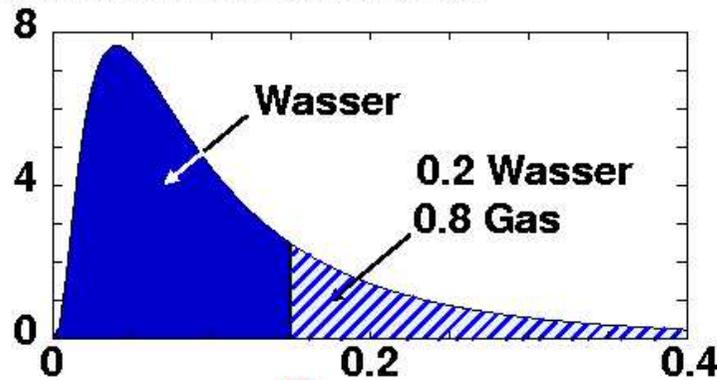
Analyse des Experiments



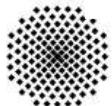
$$p < p_{deg}$$



Wahrscheinlichkeitsdichte



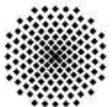
Kluftöffnungsweite a [mm]



Übergang zur Simulation

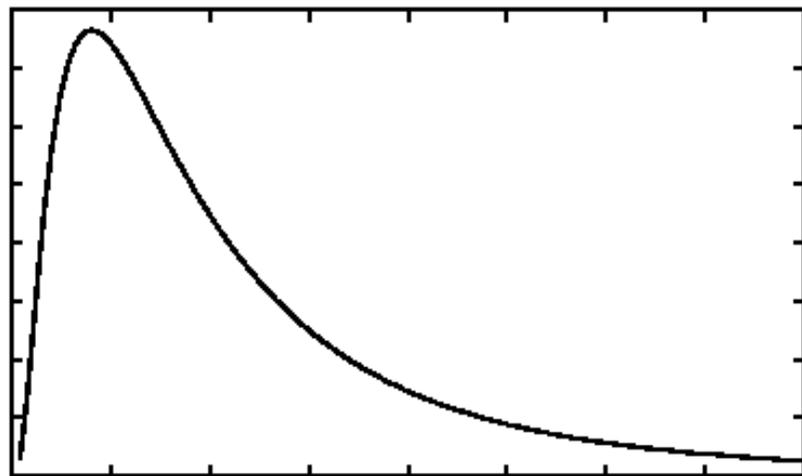
Wie kann ich dieses Experiment simulieren?

- Ausgasungsvolumen wird bestimmt aus Druck, Temperatur und Molenbruch.
- Gas belegt große Kluftöffnungsweiten aufgrund des Kapillardruckgradienten.
- **Problem: „große“ Kluftöffnungsweitenfelder**



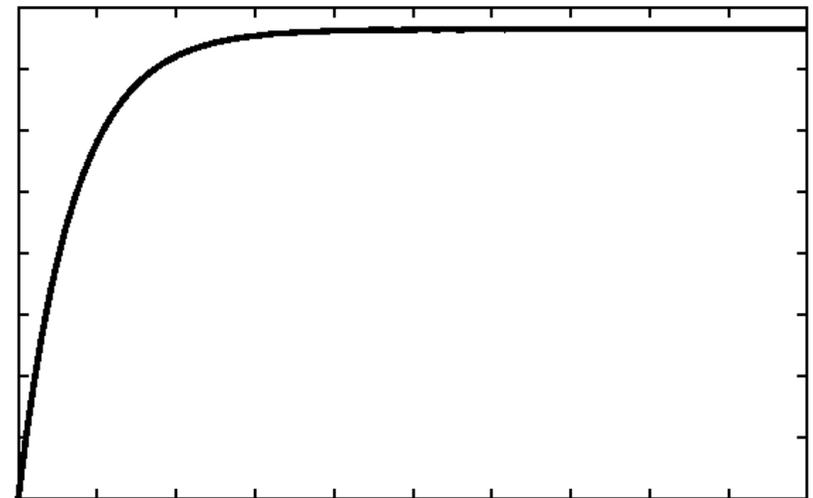
Stochastik der Kluftöffnungsweitenfelder

Wahrscheinlichkeitsdichte

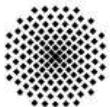


0 0.2 0.4
Kluftöffnungsweite a [mm]

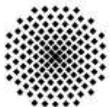
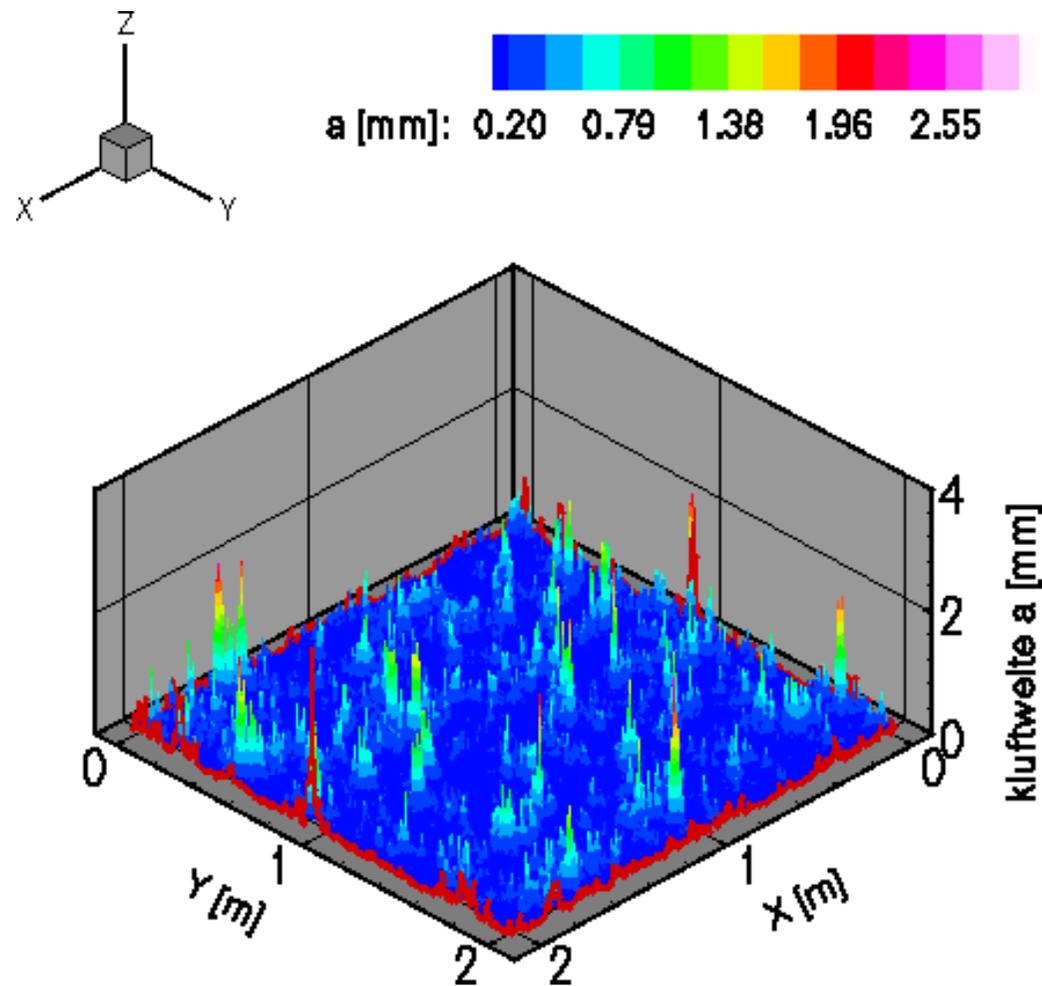
Semivarianz



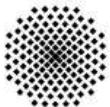
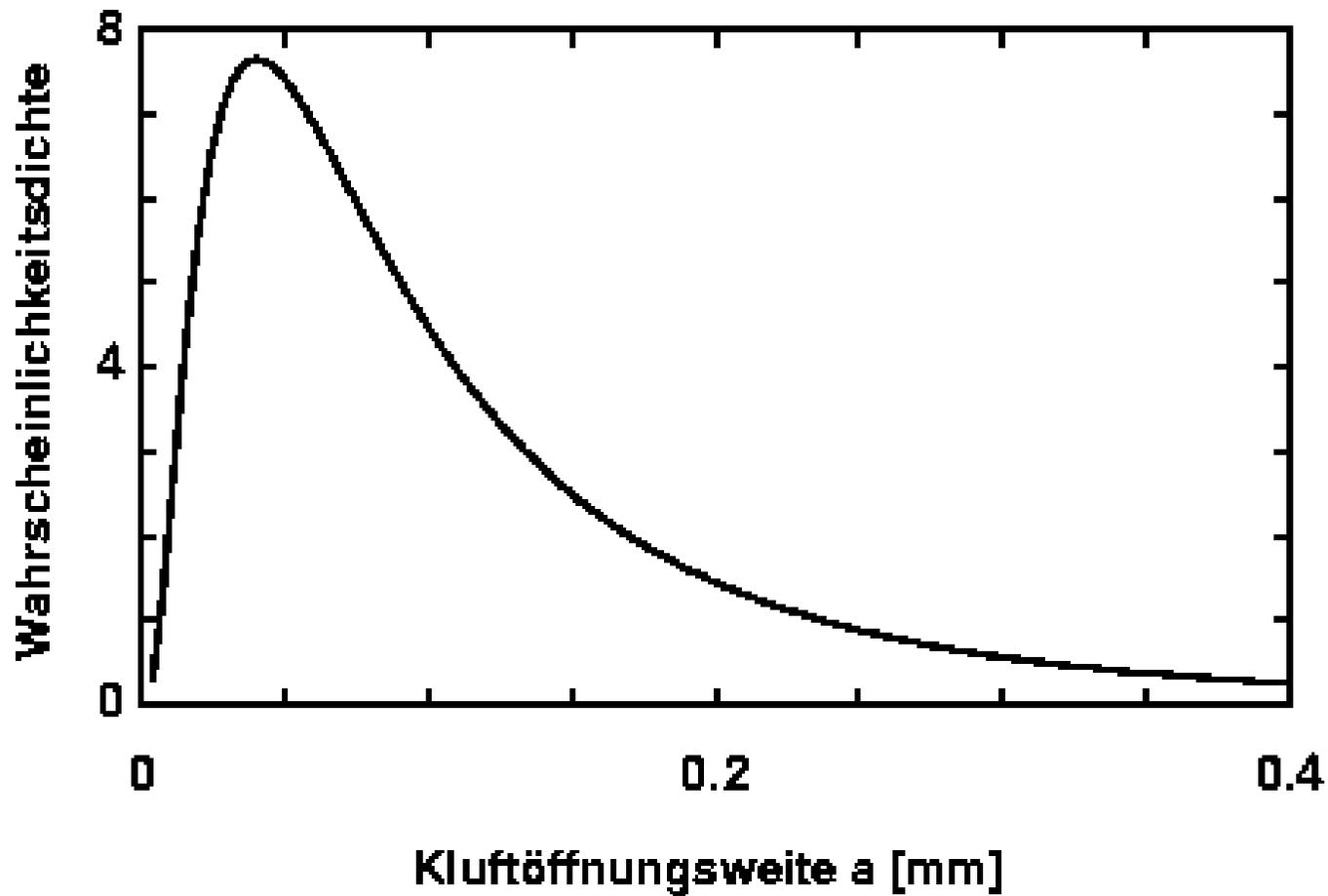
0 0.25 0.5
Abstand [mm]



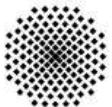
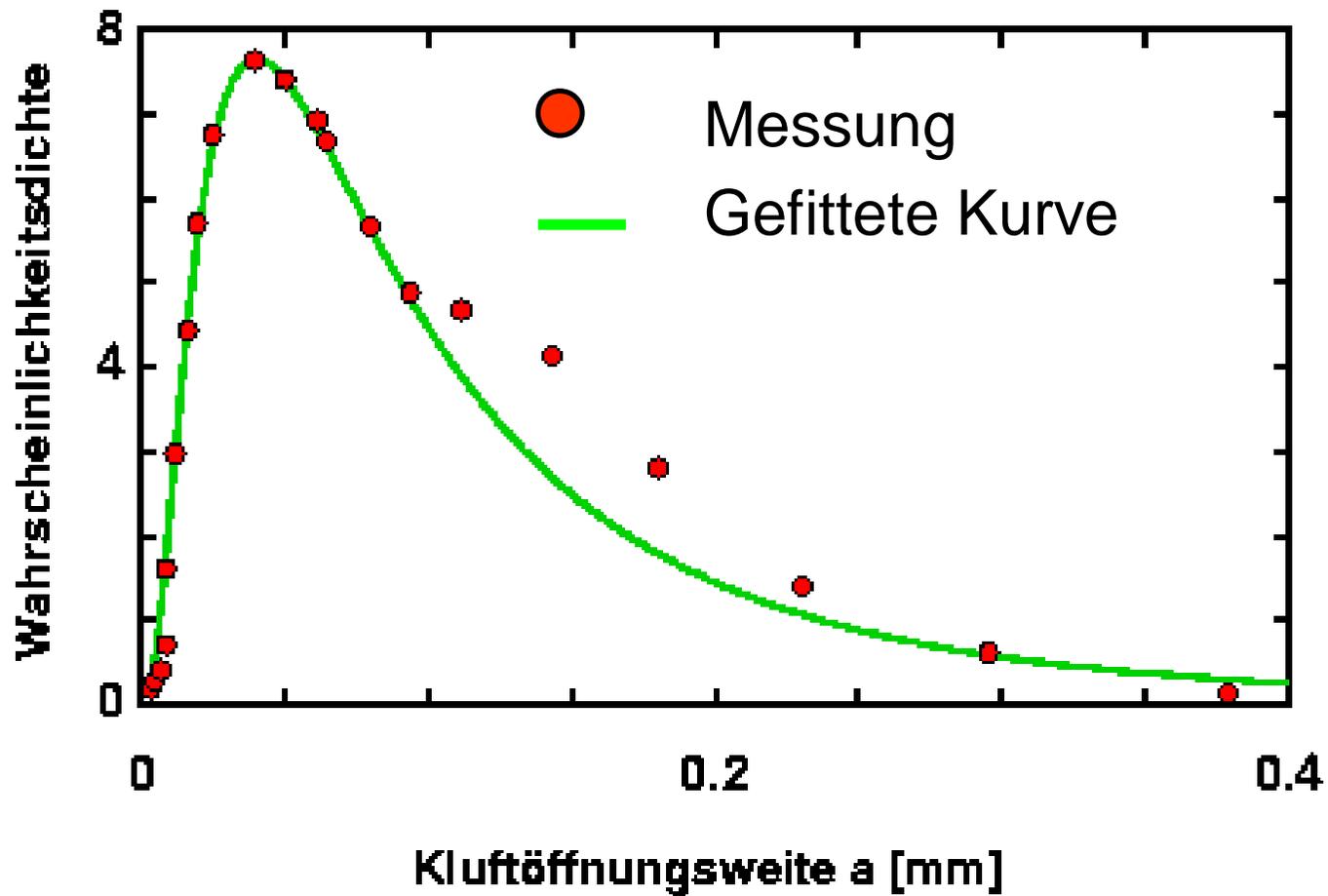
Kluftöffnungsweitenfeld



Kluftöffnungsweitenfeld

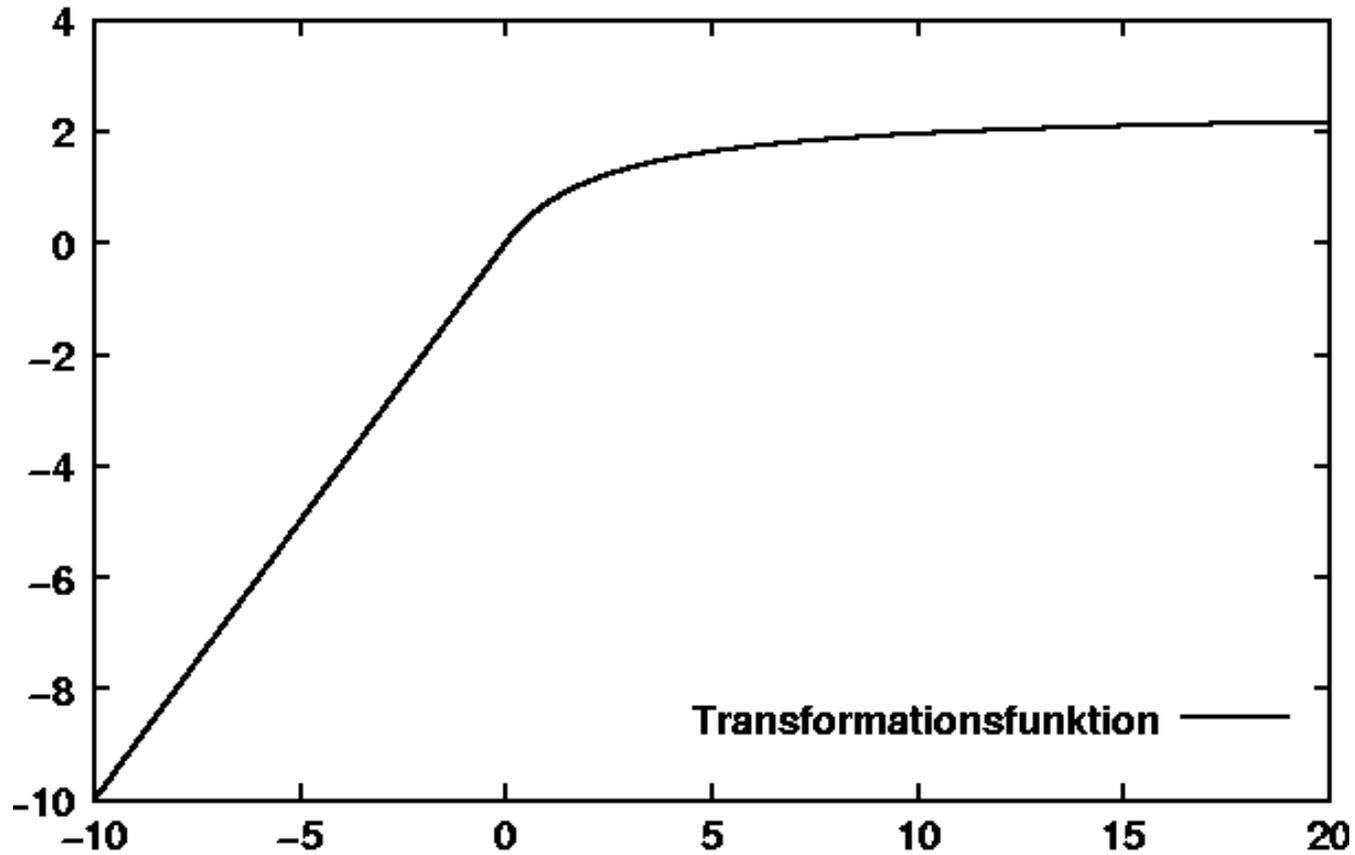


Kluftöffnungsweitenfeld

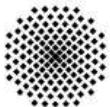


Transformationsfunktion

Transformierter Wert der Log-Normalverteilung

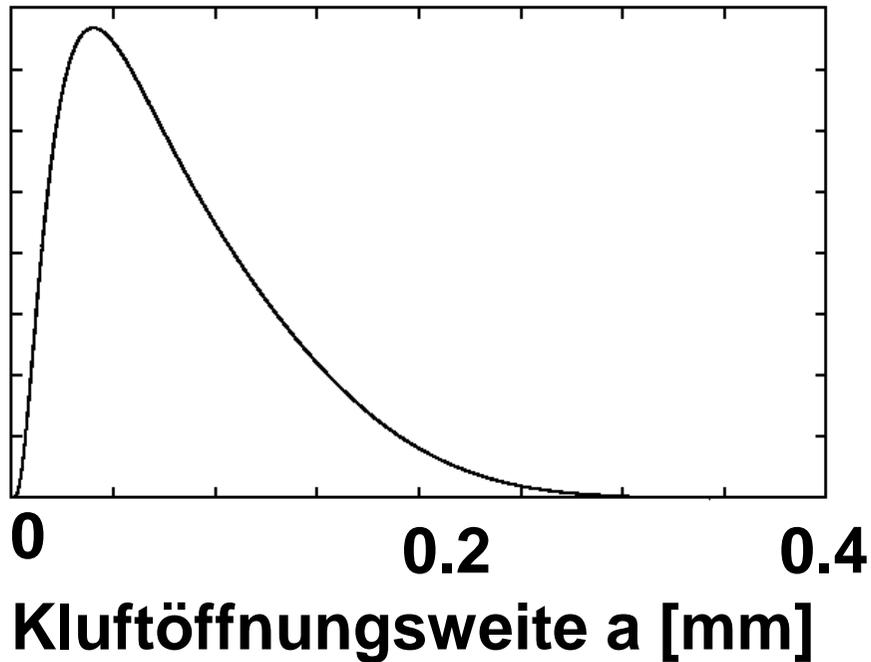


Wert der Log-Normalverteilung

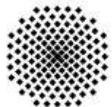
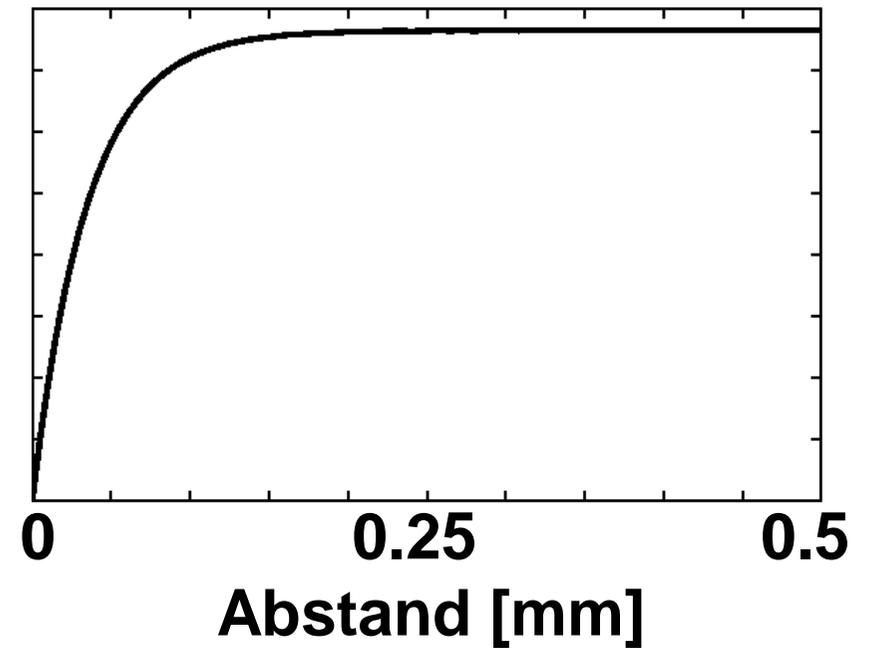


Stochastik der Kluftöffnungsweitenfelder

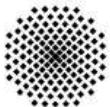
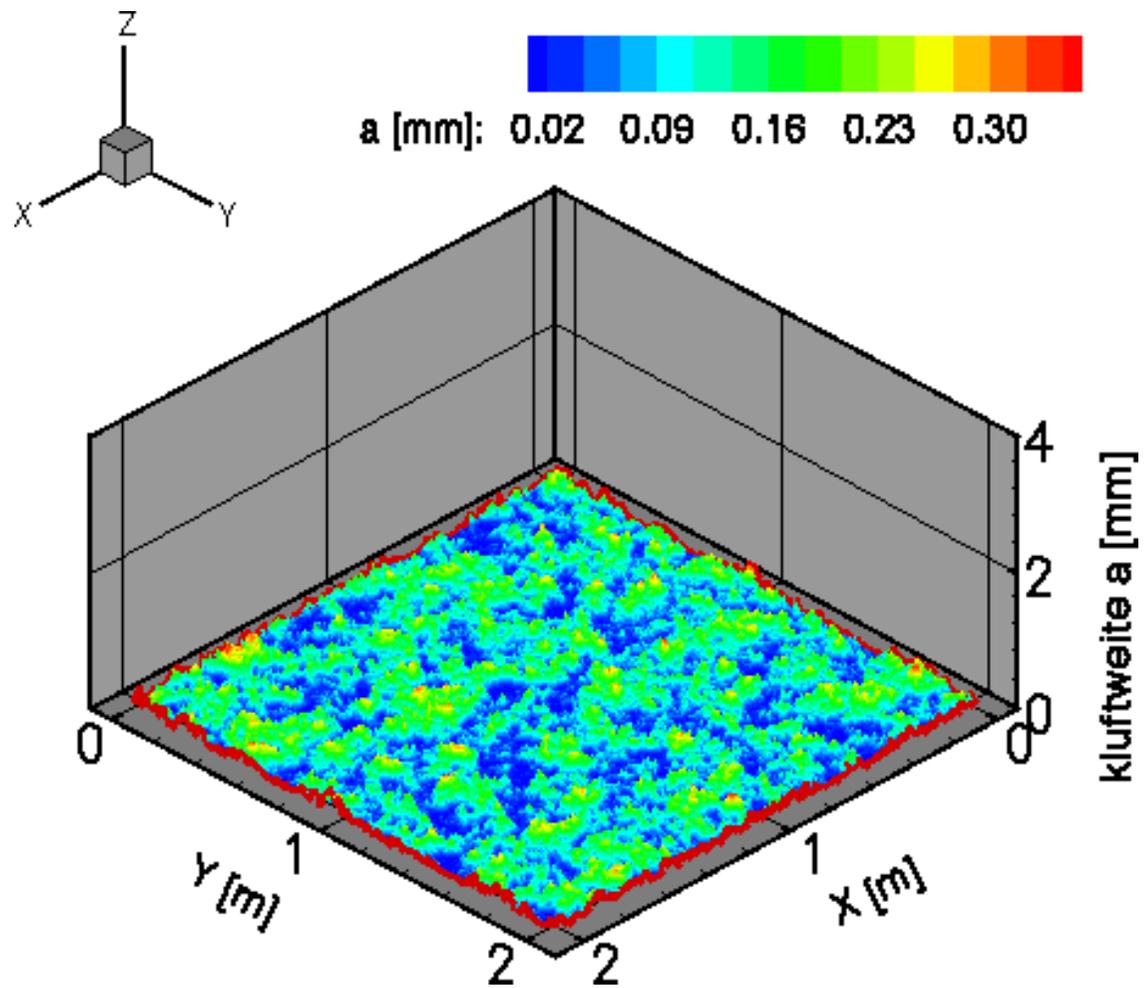
Wahrscheinlichkeitsdichte



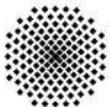
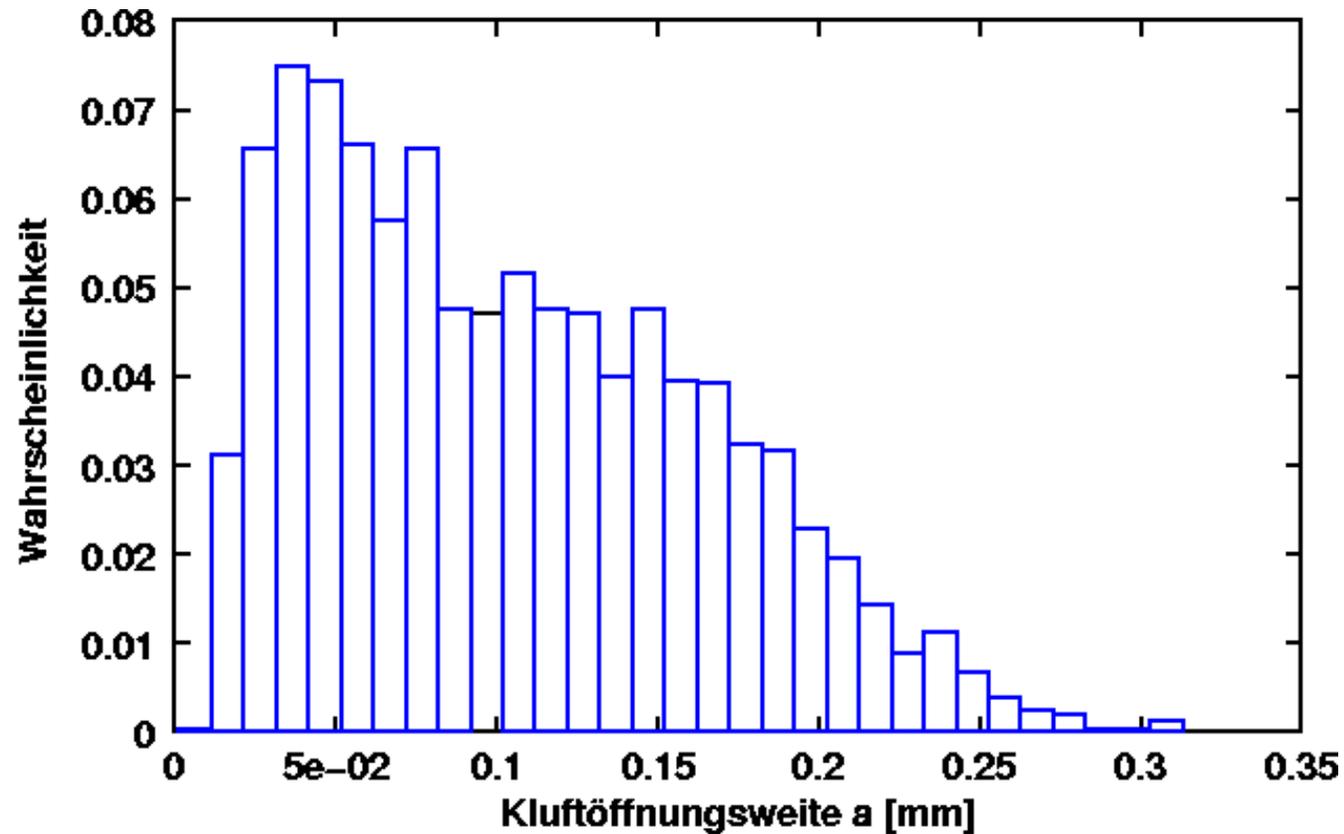
Semivarianz



Kluftöffnungsweitenfeld



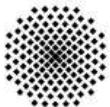
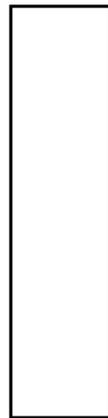
Kluftöffnungsweitenfeld



Perkulationsvorschrift

1. Bestimme zu einem gegebenen Anfangsmolenbruch für einen bestimmten Druck p und eine bestimmte Temperatur T das Ausgasungsvolumen.

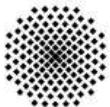
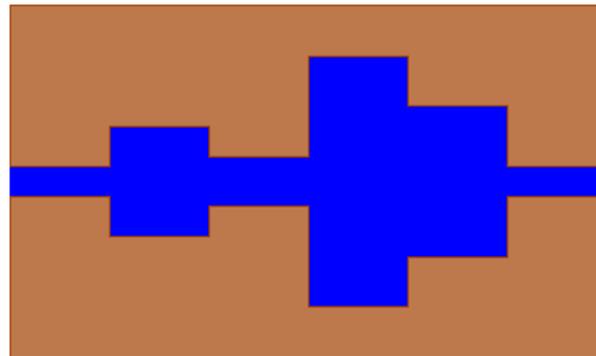
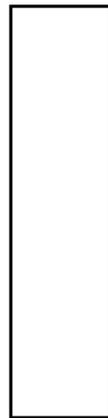
$V_g(p, T)$



Perkulationsvorschrift

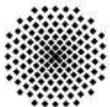
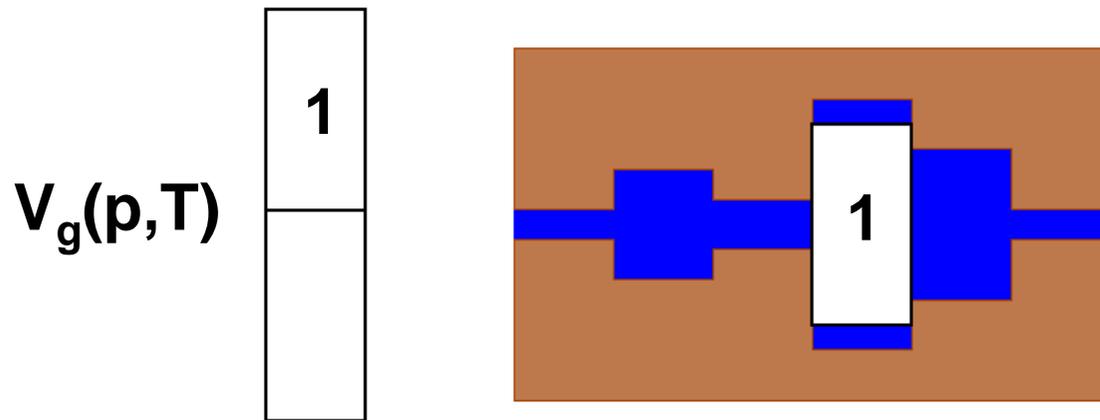
1. Bestimme zu einem gegebenen Anfangsmolenbruch für einen bestimmten Druck p und eine bestimmte Temperatur T das Ausgasungsvolumen.
2. Fülle die Kluftöffnungsweiten beginnend mit der größten solange mit Gas, bis das Ausgasungsvolumen erreicht ist.

$V_g(p,T)$



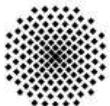
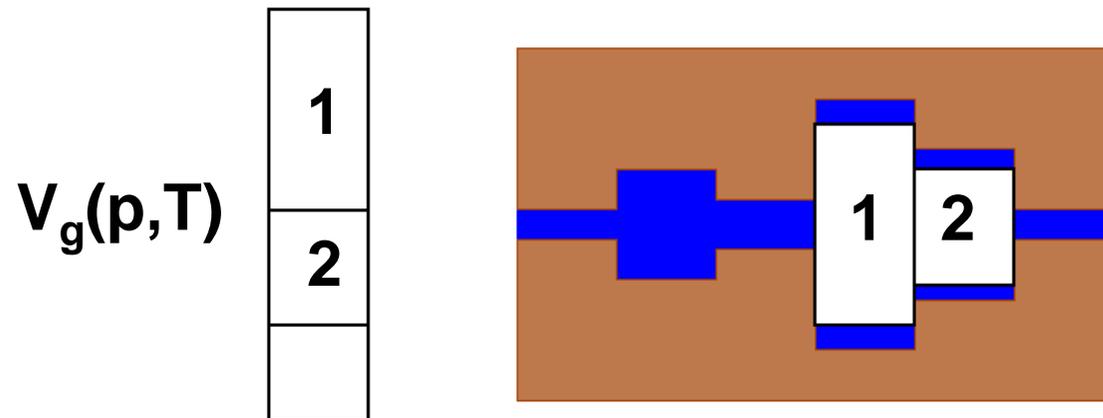
Perkulationsvorschrift

1. Bestimme zu einem gegebenen Anfangsmolenbruch für einen bestimmten Druck p und eine bestimmte Temperatur T das Ausgasungsvolumen.
2. Fülle die Kluftöffnungsweiten beginnend mit der größten solange mit Gas, bis das Ausgasungsvolumen erreicht ist.



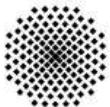
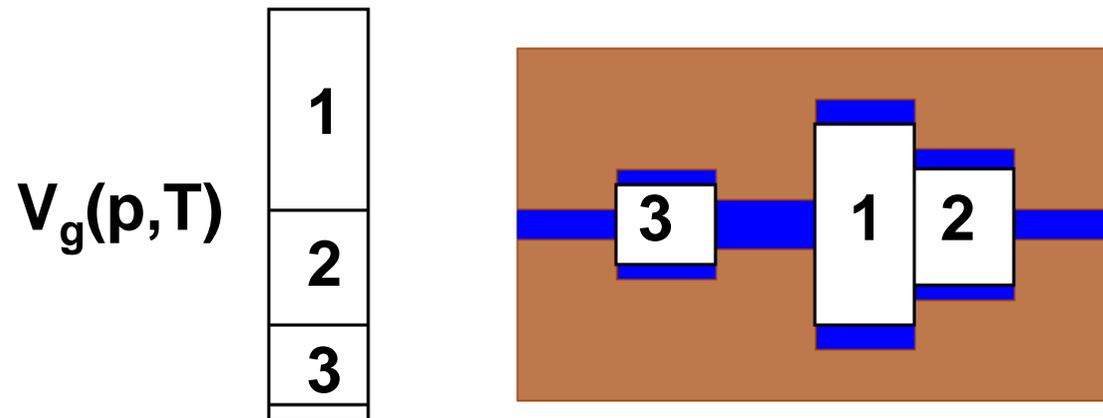
Perkolationsvorschrift

1. Bestimme zu einem gegebenen Anfangsmolenbruch für einen bestimmten Druck p und eine bestimmte Temperatur T das Ausgasungsvolumen.
2. Fülle die Kluftöffnungsweiten beginnend mit der größten solange mit Gas, bis das Ausgasungsvolumen erreicht ist.



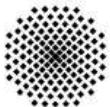
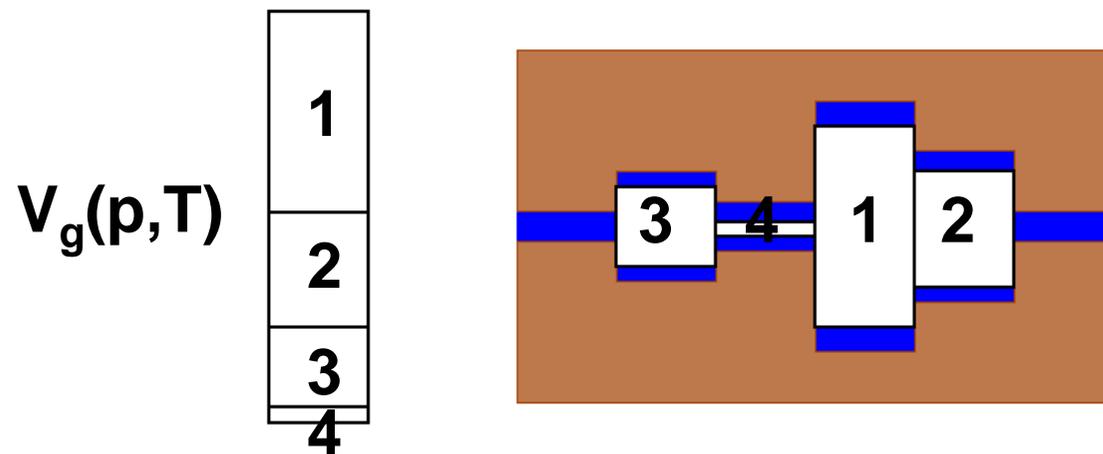
Perkolationsvorschrift

1. Bestimme zu einem gegebenen Anfangsmolenbruch für einen bestimmten Druck p und eine bestimmte Temperatur T das Ausgasungsvolumen.
2. Fülle die Kluftöffnungsweiten beginnend mit der größten solange mit Gas, bis das Ausgasungsvolumen erreicht ist.



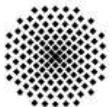
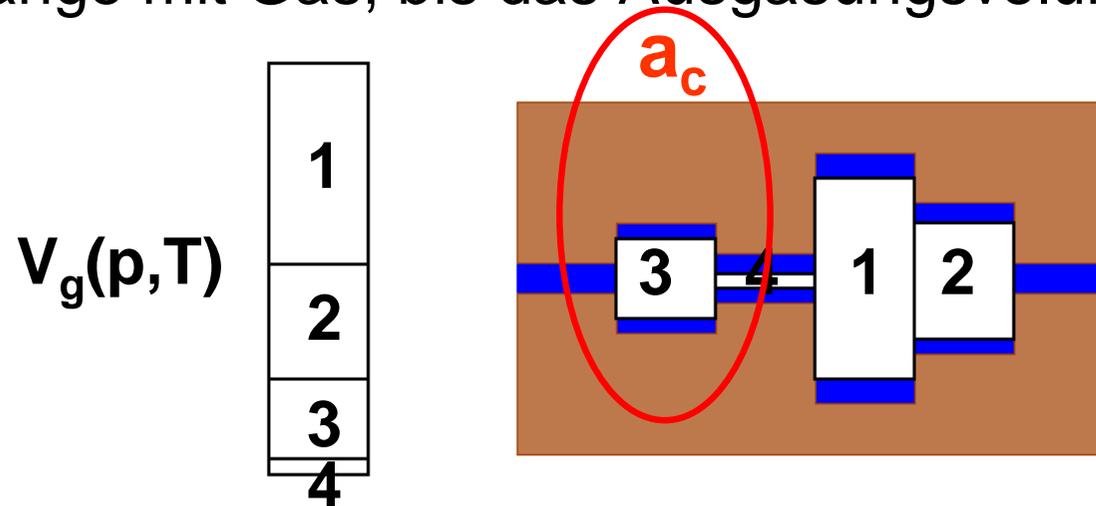
Perkolationsvorschrift

1. Bestimme zu einem gegebenen Anfangsmolenbruch für einen bestimmten Druck p und eine bestimmte Temperatur T das Ausgasungsvolumen.
2. Fülle die Kluftöffnungsweiten beginnend mit der größten solange mit Gas, bis das Ausgasungsvolumen erreicht ist.

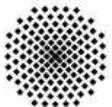
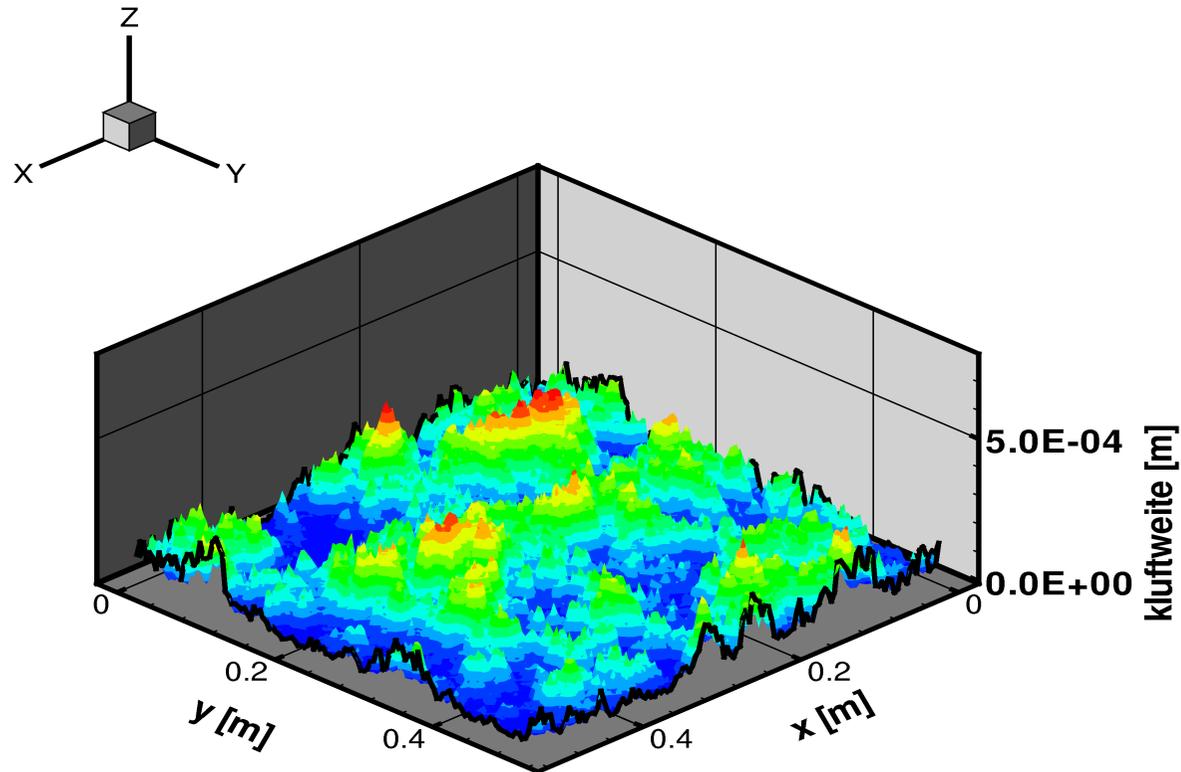


Perkulationsvorschrift

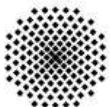
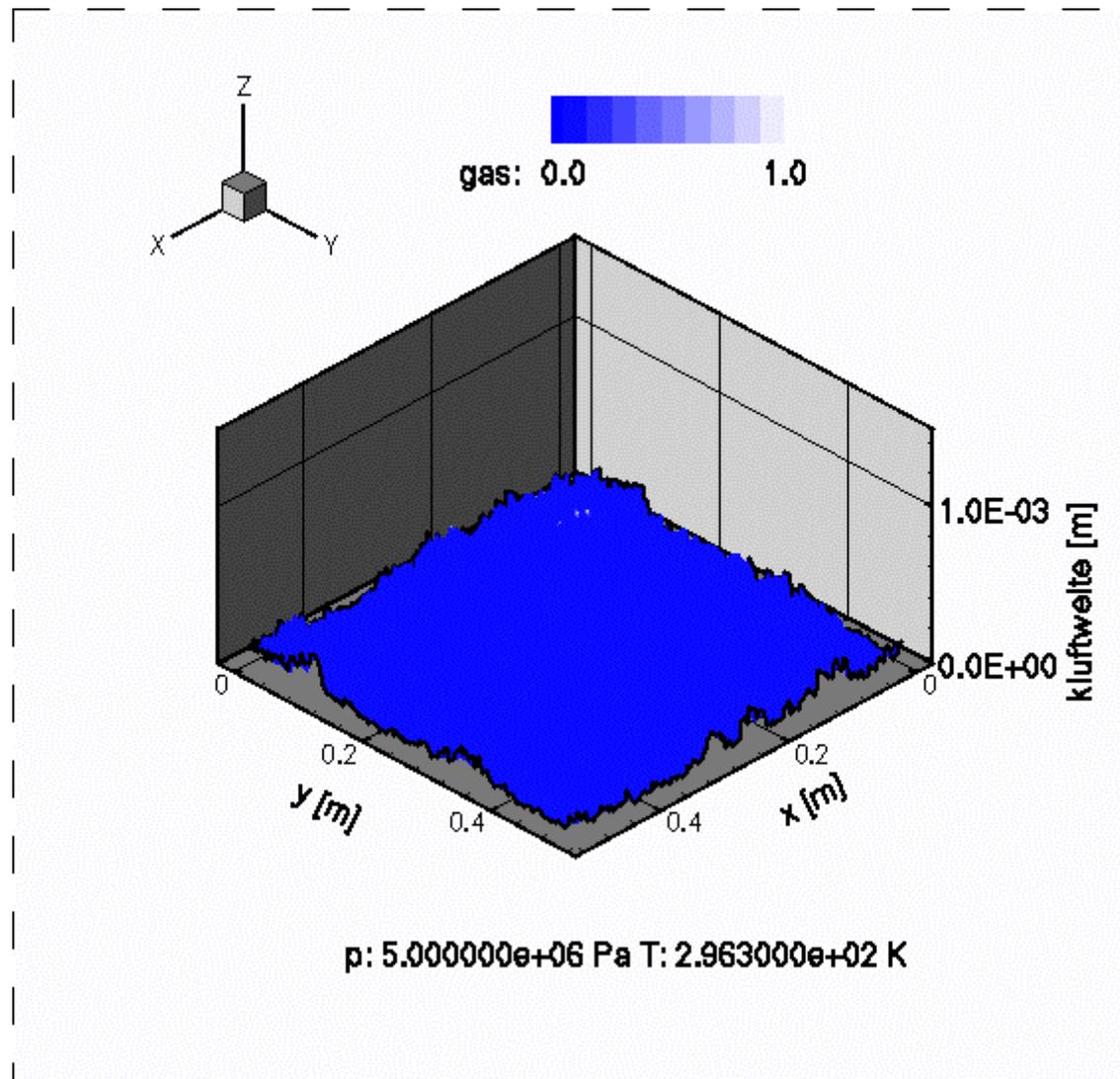
1. Bestimme zu einem gegebenen Anfangsmolenbruch für einen bestimmten Druck p und eine bestimmte Temperatur T das Ausgasungsvolumen.
2. Fülle die Kluftöffnungsweiten beginnend mit der größten solange mit Gas, bis das Ausgasungsvolumen erreicht ist.



Simulation der Entgasung auf der Mikroskala

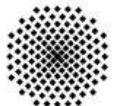


Simulation der Entgasung auf der Mikroskala



Gliederung des Vortrags

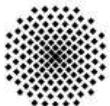
1. Entgasung in der Nähe von Endlagern
2. Einordnung des Problems
3. Erfassung der Entgasung auf der Mikroskala
4. Upscaling der Parameter auf die Makroskala
5. Homogenisierung mittels Renormalisierung
6. Erfassung der Entgasung auf der Makroskala
7. Zusammenfassung und Ausblick



Zwei-Phasen-Strömung

$$-\phi \rho_w \frac{\partial S_g}{\partial t} - \nabla \cdot \left(\frac{\rho_w \mathbf{k}_{rw}}{\mu_w} \mathbf{K} (\nabla \mathbf{p}_w - \rho_w \mathbf{g}) \right) - \mathbf{q}_w = \mathbf{0}$$

$$\phi \frac{\partial (\rho_g S_g)}{\partial t} - \nabla \cdot \left(\frac{\rho_g \mathbf{k}_{rg}}{\mu_g} \mathbf{K} (\nabla \mathbf{p}_w + \nabla \mathbf{p}_c - \rho_g \mathbf{g}) \right) - \mathbf{q}_n = \mathbf{0}$$

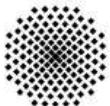


Zwei-Phasen-Strömung

$$-\phi \rho_w \frac{\partial S_g}{\partial t} - \nabla \cdot \left(\frac{\rho_w \mathbf{k}_{rw}}{\mu_w} \mathbf{K} (\nabla \mathbf{p}_w - \rho_w \mathbf{g}) \right) - \mathbf{q}_w = \mathbf{0}$$

$$\phi \frac{\partial (\rho_g S_g)}{\partial t} - \nabla \cdot \left(\frac{\rho_g \mathbf{k}_{rg}}{\mu_g} \mathbf{K} (\nabla \mathbf{p}_w + \nabla \mathbf{p}_c - \rho_g \mathbf{g}) \right) - \mathbf{q}_n = \mathbf{0}$$

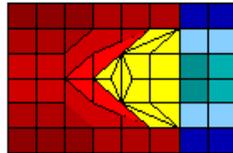
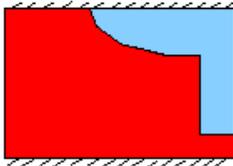
$\mathbf{p}_c, \mathbf{K}, \mathbf{k}_{rw}, \mathbf{k}_{rg}$



Numerischer Löser

IWS, Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung

- Problembeschreibung
- konstitutive Beziehungen
- physikalisch – mathematische Modelle
- Diskretisierungsmethoden
- numerische Schemata
- Verfeinerungskriterien
- physikalische Interpretation



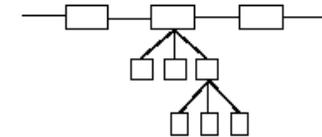
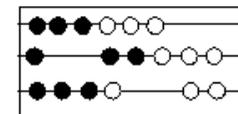
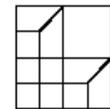
MUFTE

(Helmig et al. 1997, 1998) (Bastian et al. 1997, 1998)



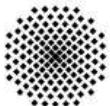
Interdisziplinäres Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen (IWR)

- Mehrgitterdatenstrukturen
- lokale Netzverfeinerung
- Löser (Mehrgitter ...)
- r,h,p – adaptive Methoden
- Parallelisierung
- Benutzerschnittstelle
- grafische Darstellung



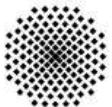
UG

(S. Lang, K. Birken, K. Johannsen et al. 1997)

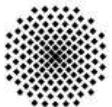
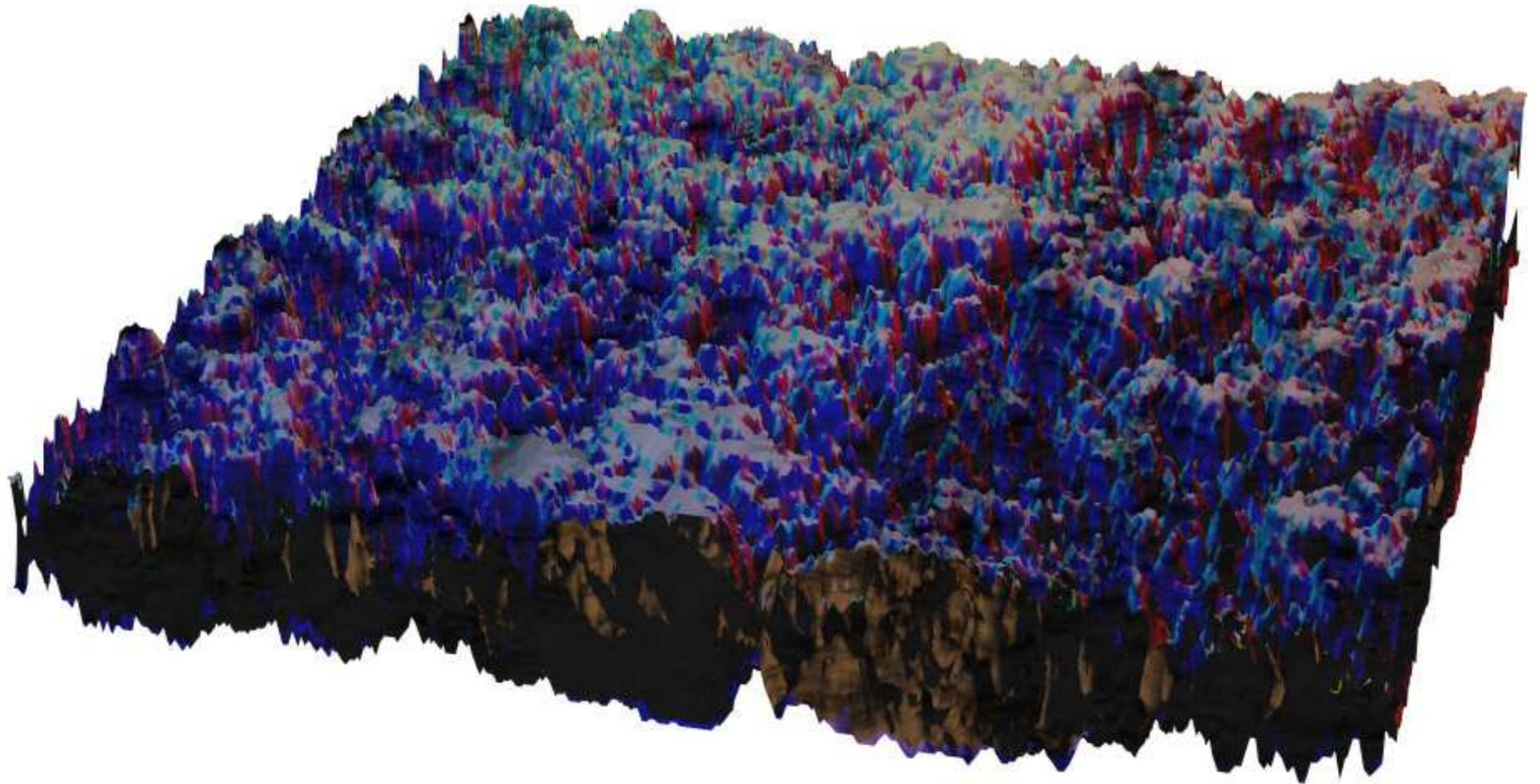


Perkolation: Berechnung des Kapillardrucks

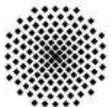
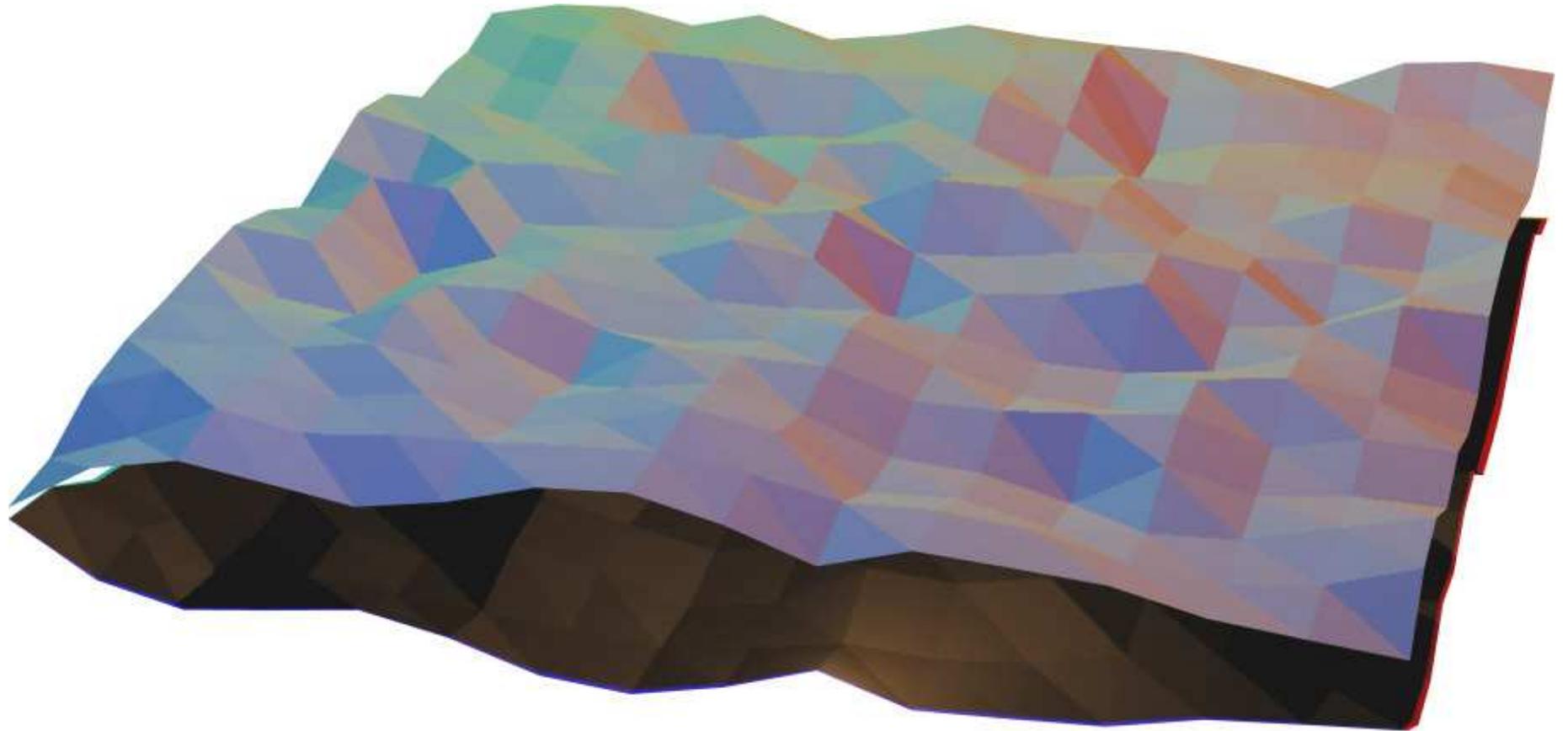
p_c, K, k_{rw}, k_{rg}



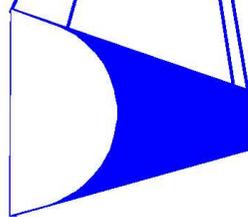
Kluftöffnungsweitenfeld



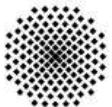
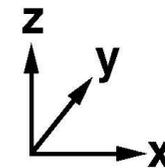
Kapillardruck



Kapillardruck

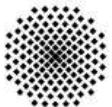


$$p_c = \sigma \frac{1}{a_c}$$

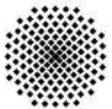
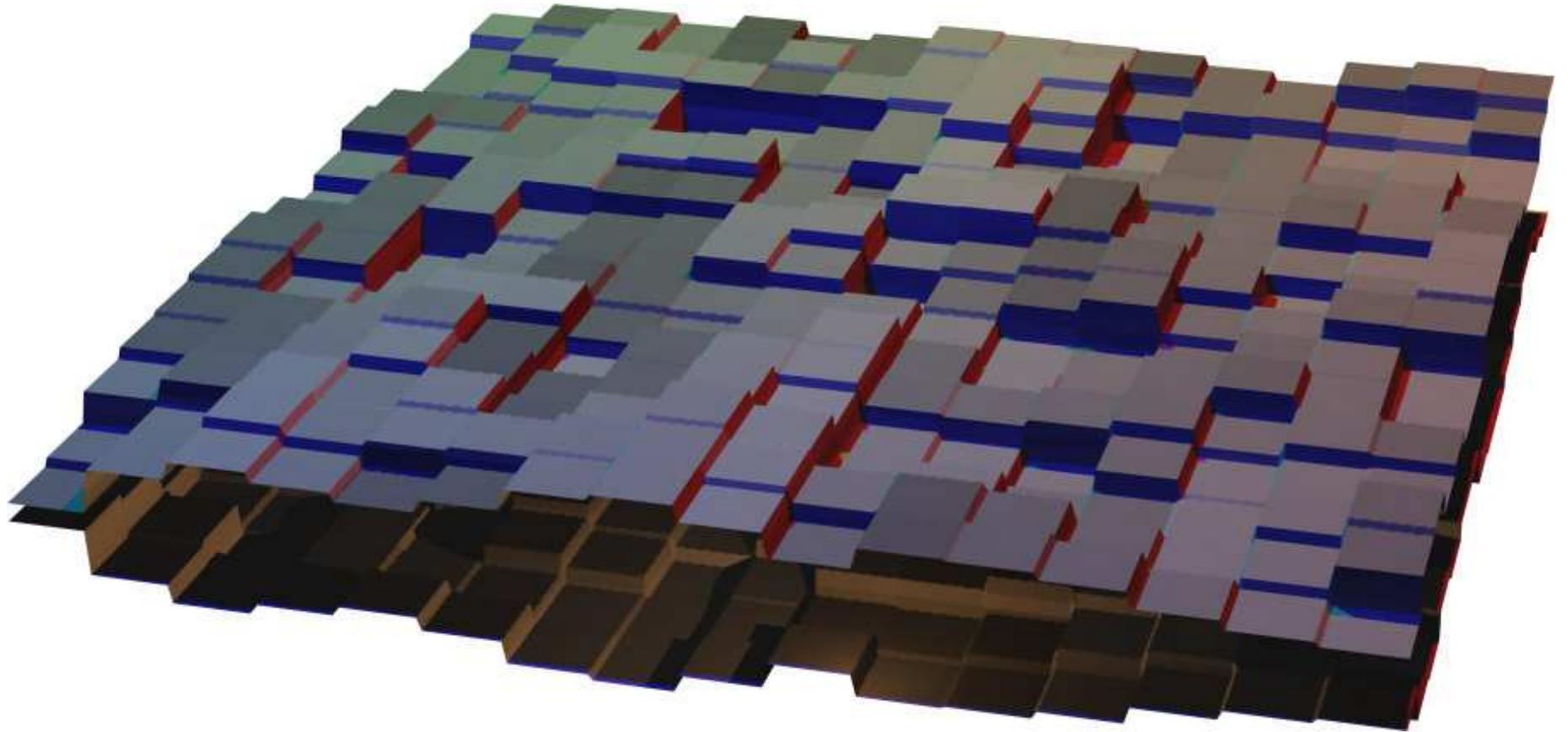


Effektive Permeabilität

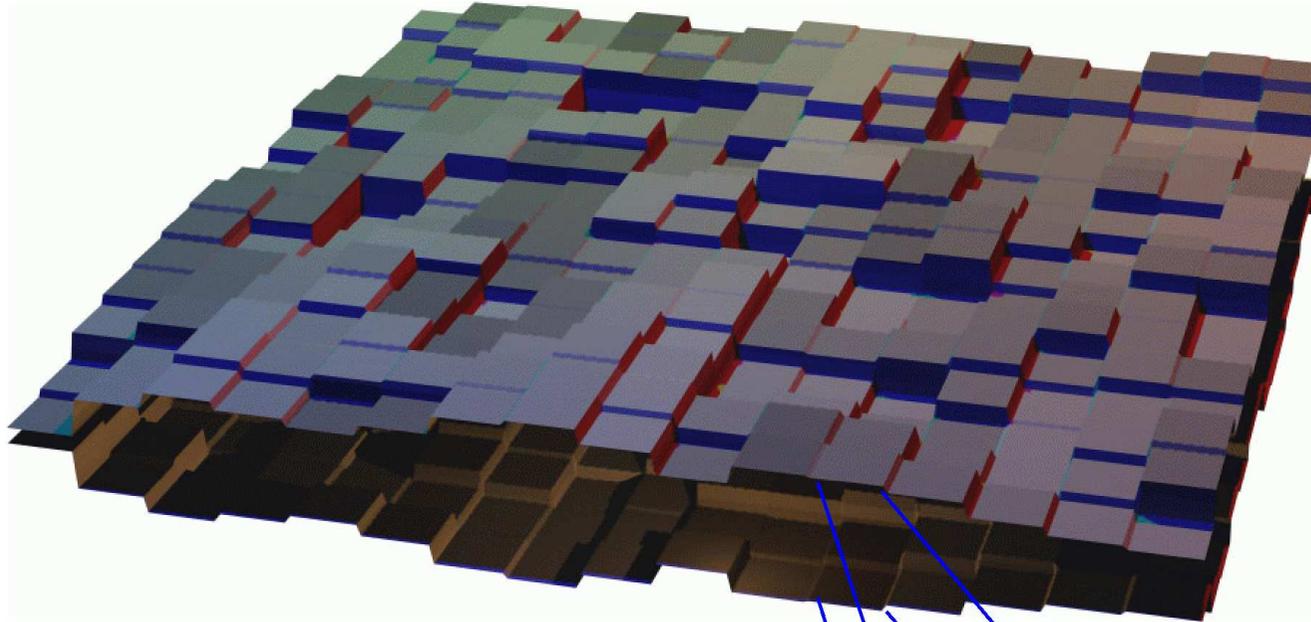
P_c, K, k_{rw}, k_{rg}



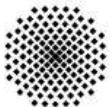
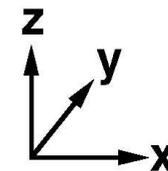
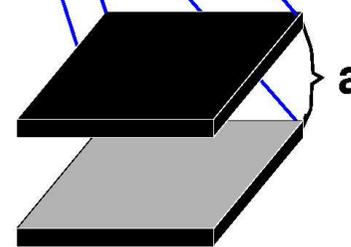
Effektive Permeabilität



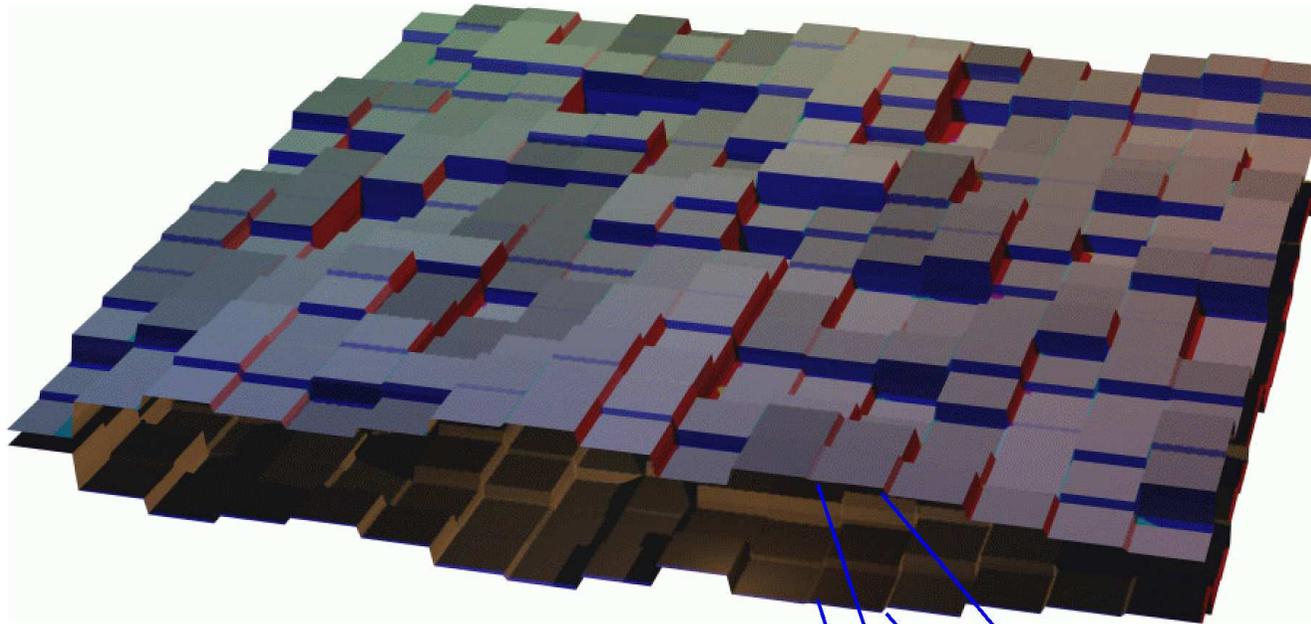
Effektive Permeabilität



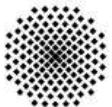
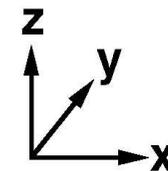
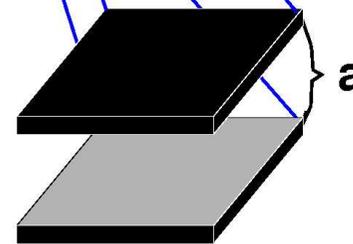
$$\int_{z=0}^{z=a} \mathbf{v}_x dz = \mathbf{a} \cdot \mathbf{v}_x(z) = \frac{a^3}{12\mu} \frac{dp}{dx}$$



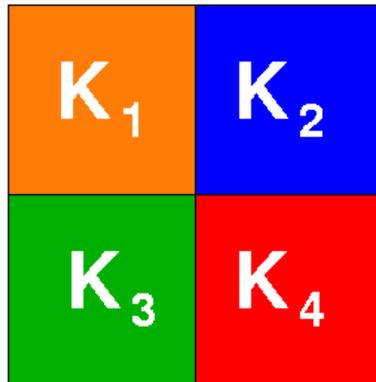
Effektive Permeabilität



$$\mathbf{K} = \frac{a^2}{12}$$



Effektive Permeabilität



Messungen der Kluftöffnungsweiten ergeben:

1. Isometrische Verteilung
2. Log-normale Verteilung

Materón:

$$K_{\text{eff}} = \sqrt[4]{K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4}$$

King:

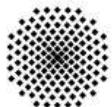
$$K_{\text{eff}} = \frac{4 \cdot A \cdot B \cdot C}{C \cdot D + E}$$

$$A = (K_1 + K_3)$$

$$B = (K_2 + K_4)$$

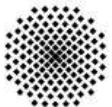
$$C = (K_2 K_4 (K_1 + K_3) + K_1 K_3 (K_2 + K_4))$$

$$D = (K_1 + K_2 + K_3 + K_4)$$

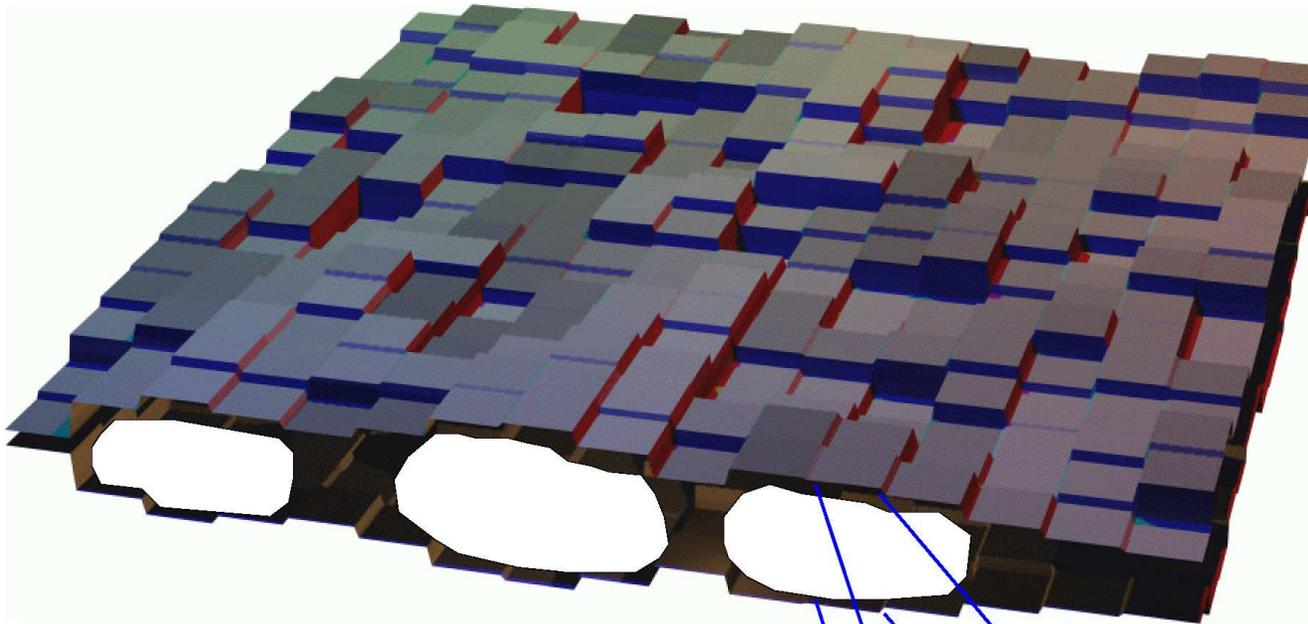


Relative Permeabilität der Wasserphase

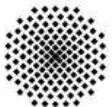
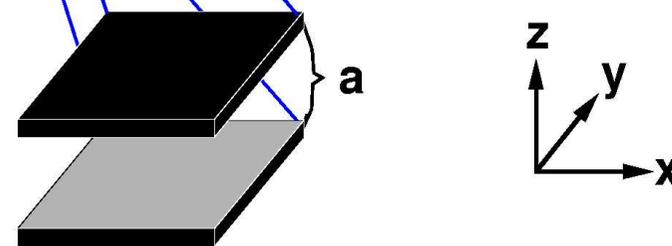
p_c, K, k_{rw}, k_{rg}



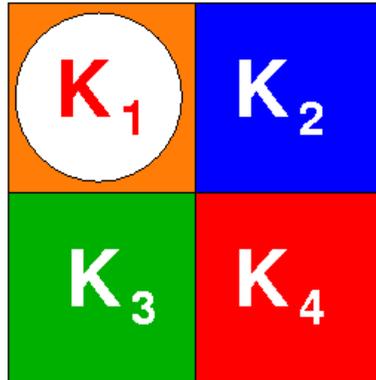
Relative Permeabilität der Wasserphase



$$K^{\text{deg}} = \frac{(0.2 \cdot a)^2}{12}$$



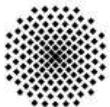
Relative Permeabilität der Wasserphase



Bei Belegung der Kluftweite 1 mit Gas:

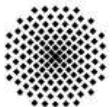
$$\mathbf{K}_{\text{eff}}^{\text{deg}} = \sqrt[4]{K_1^{\text{deg}} \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4}$$

$$\mathbf{k}_{\text{rw}} = \frac{\mathbf{K}_{\text{eff}}^{\text{deg}}}{\mathbf{K}_{\text{eff}}}$$

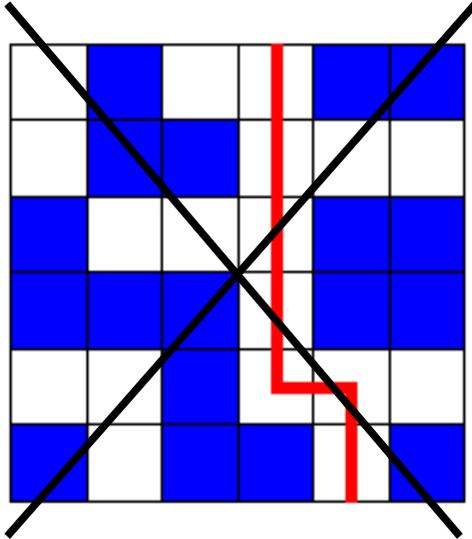


Relative Permeabilität der Gasphase

p_c , K , k_{rw} , k_{rg}



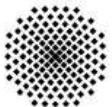
Relative Permeabilität der Gasphase



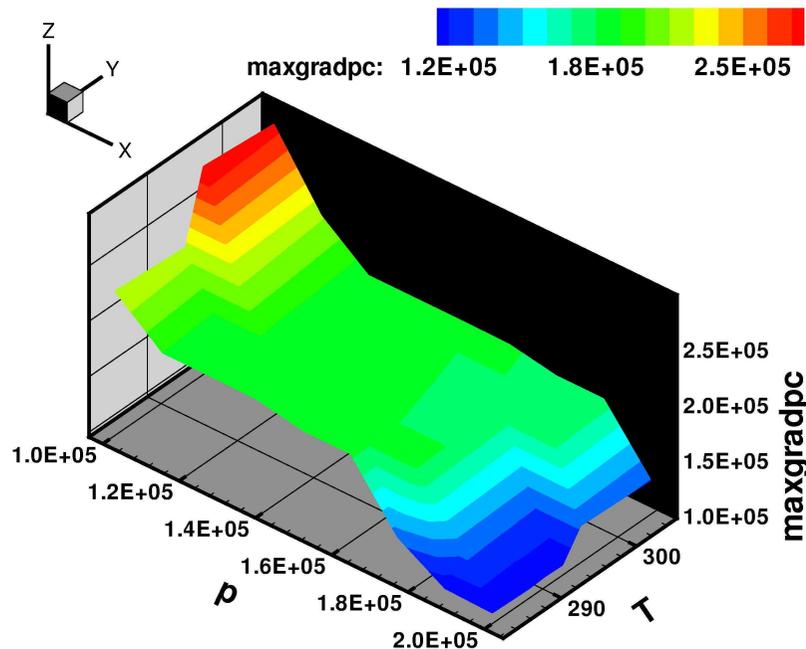
Die von Gas belegten Kluftöffnungsweiten bilden keinen perkolierenden Cluster.

→ Es gibt keinen Migrationspfad für das Gas.

$$k_{rg} = 0$$



Relative Permeabilität der Gasphase



Gradient des Kapillardrucks:

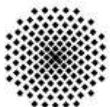
100000 bis 200000 Pa/m

Auftrieb:

ca. 10000 Pa/m

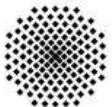
Gradient des Drucks:

ca. 1000 Pa/m



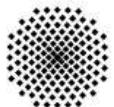
Perkolation: Parameter

p_c, K, k_{rw}, k_{rg}

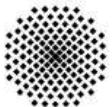
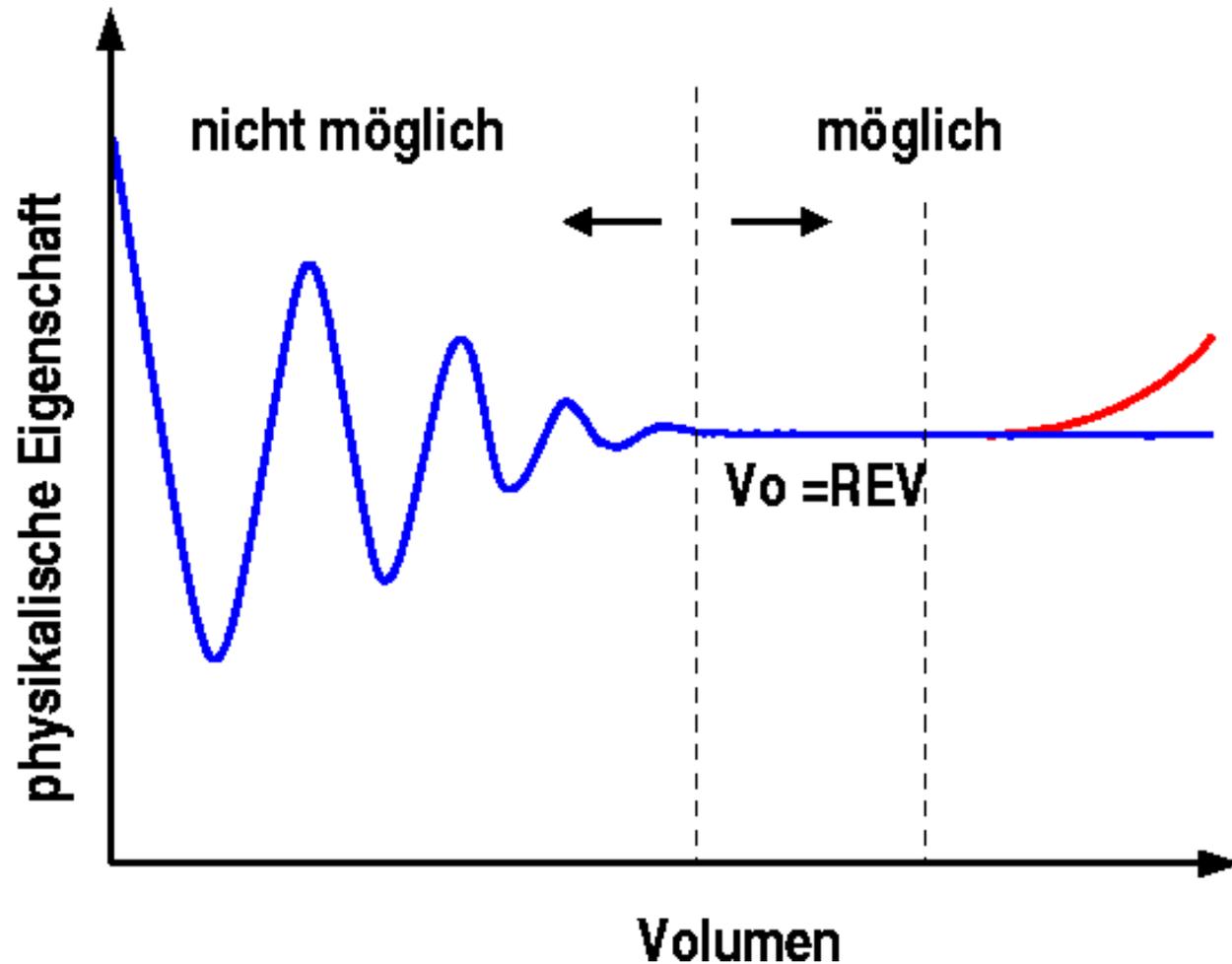


Gliederung des Vortrags

1. Entgasung in der Nähe von Endlagern
2. Einordnung des Problems
3. Erfassung der Entgasung auf der Mikroskala
4. Upscaling der Parameter auf die Makroskala
5. Homogenisierung mittels Renormalisierung
6. Erfassung der Entgasung auf der Makroskala
7. Zusammenfassung und Ausblick

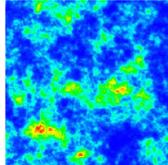


Bildung eines Repräsentativen Elementarvolumens

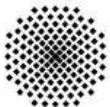


Renormalisierung

RN Stufe 0:

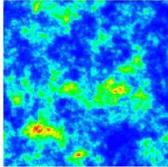


generiertes Kluftöffnungsweitenfeld

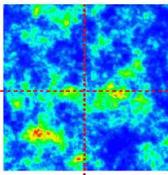


Renormalisierung

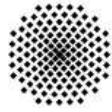
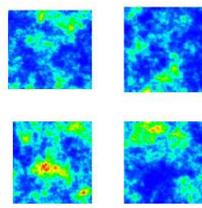
RN Stufe 0



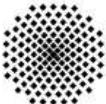
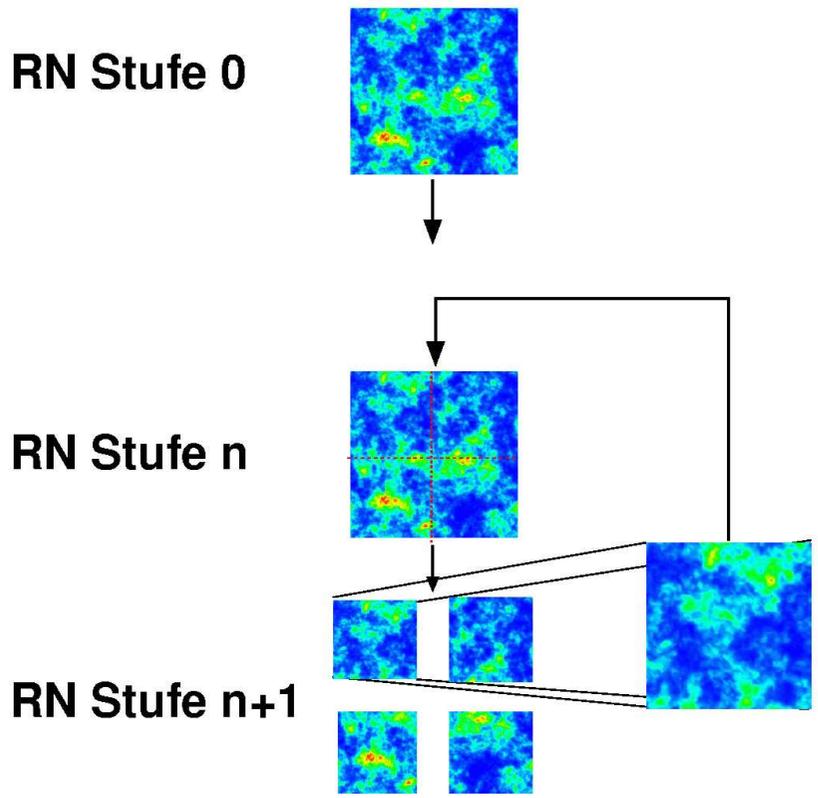
RN Stufe n



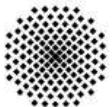
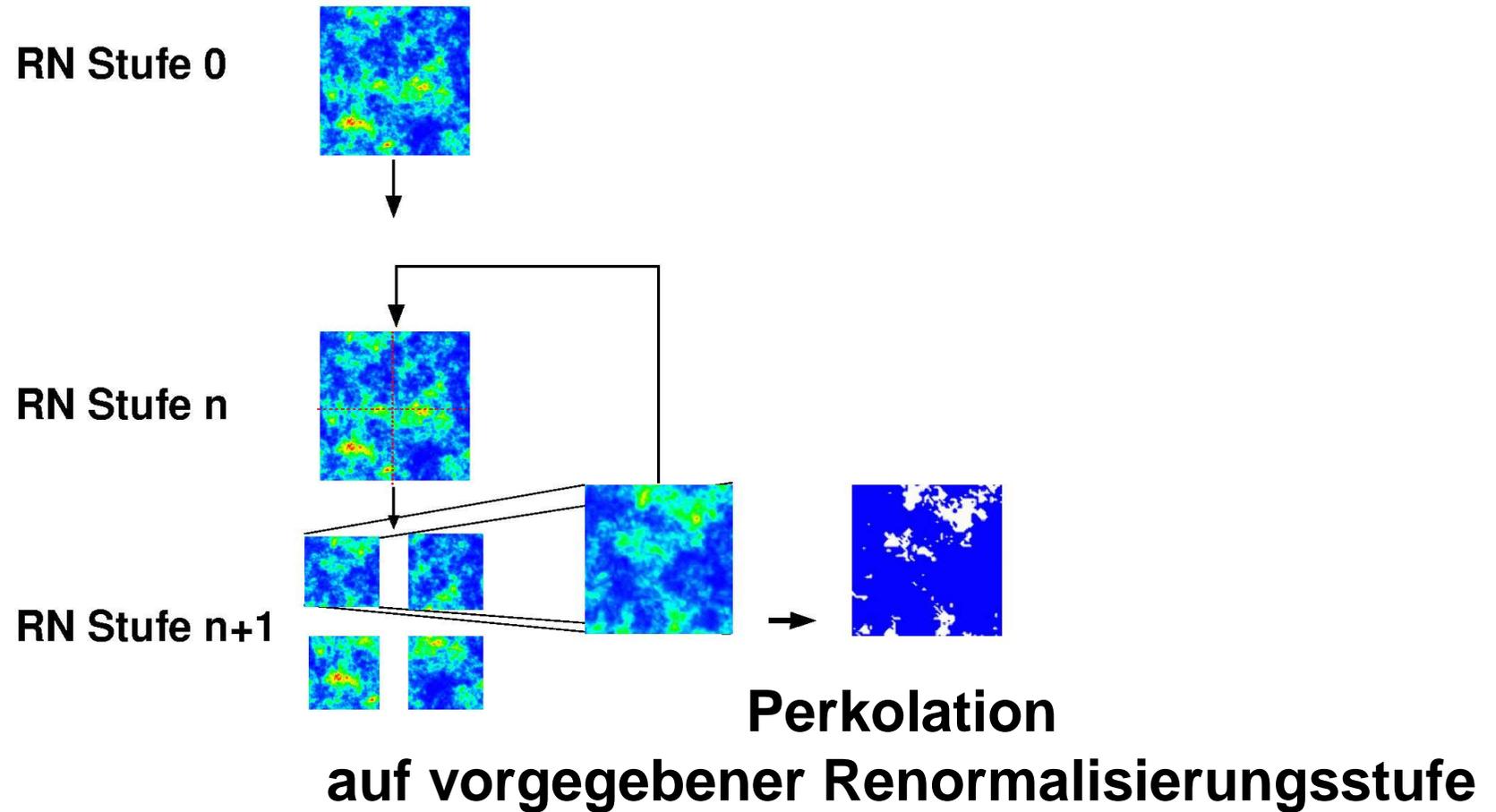
RN Stufe n+1



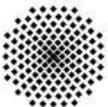
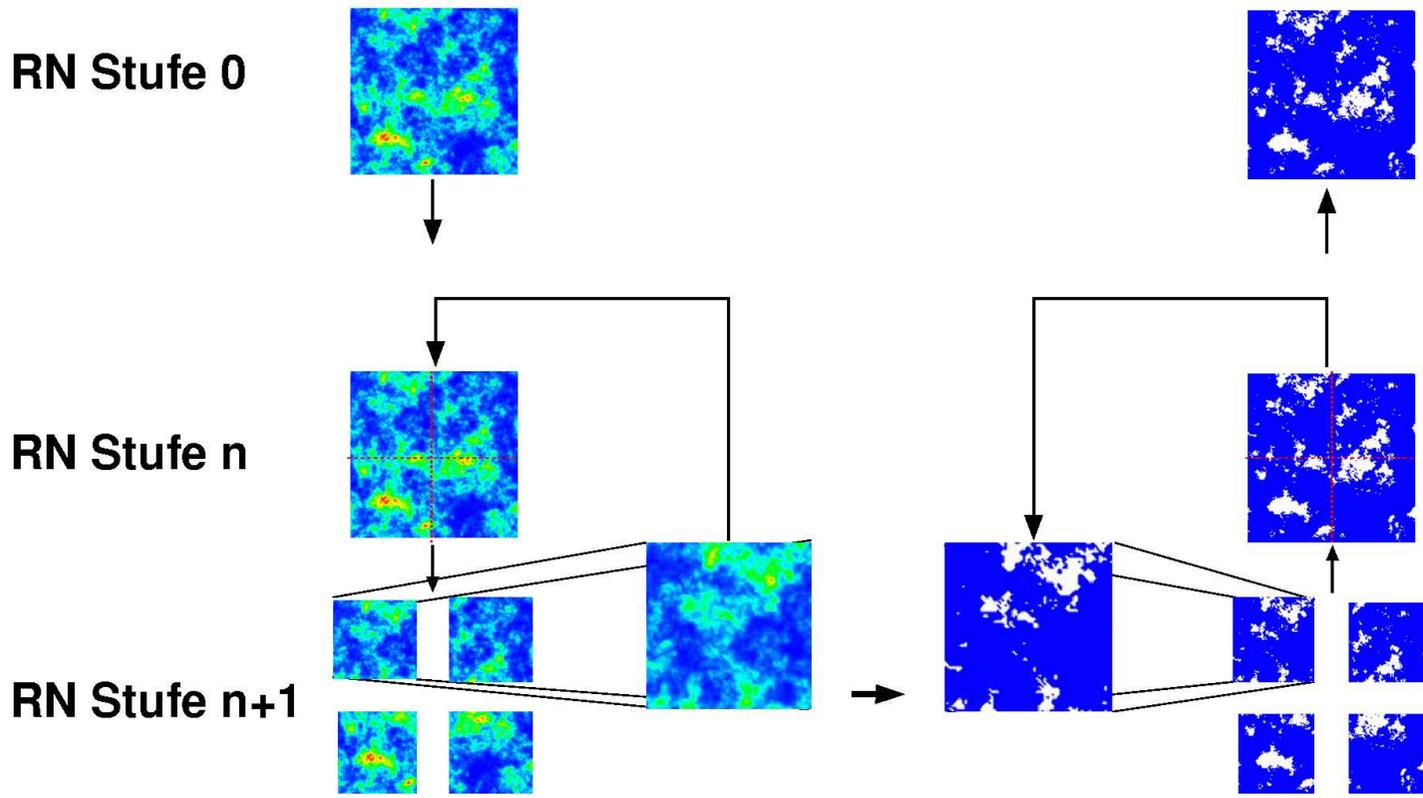
Renormalisierung



Renormalisierung

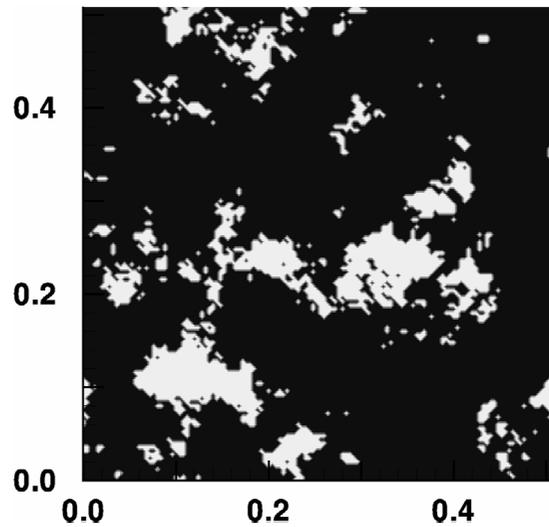


Renormalisierung

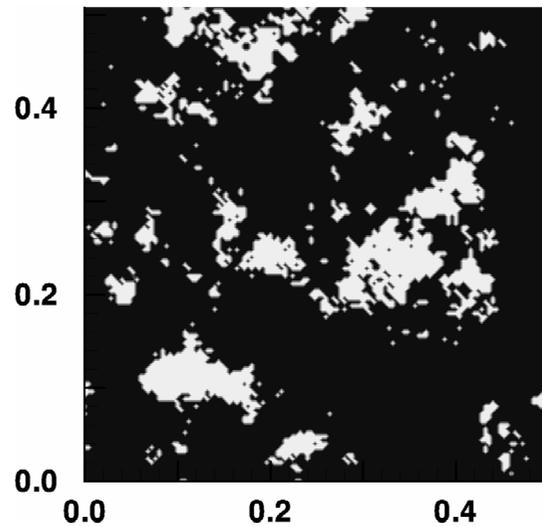


Renormalisierung

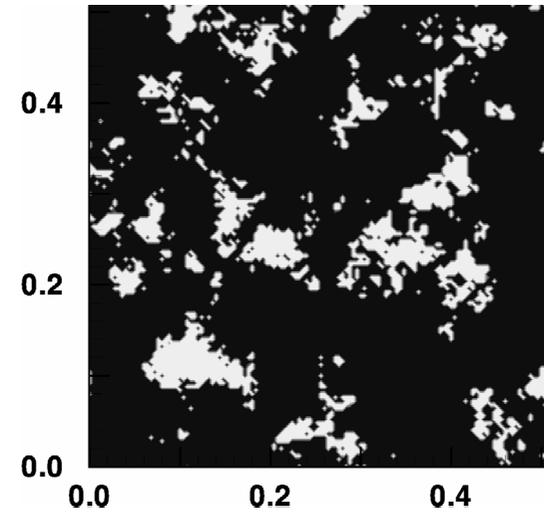
 Gasbelegung  Wasserbelegung



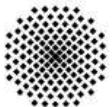
RNS 0



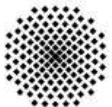
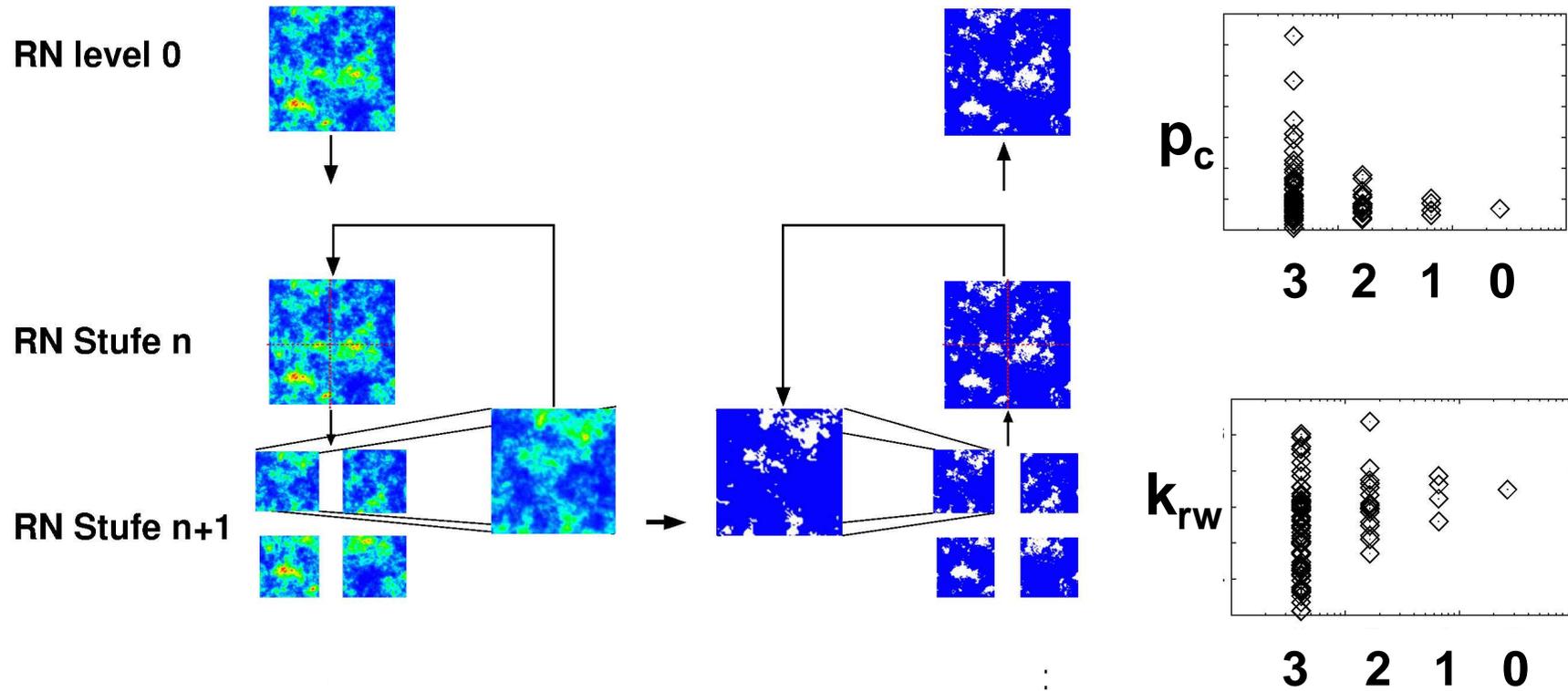
RNS 1



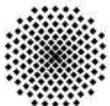
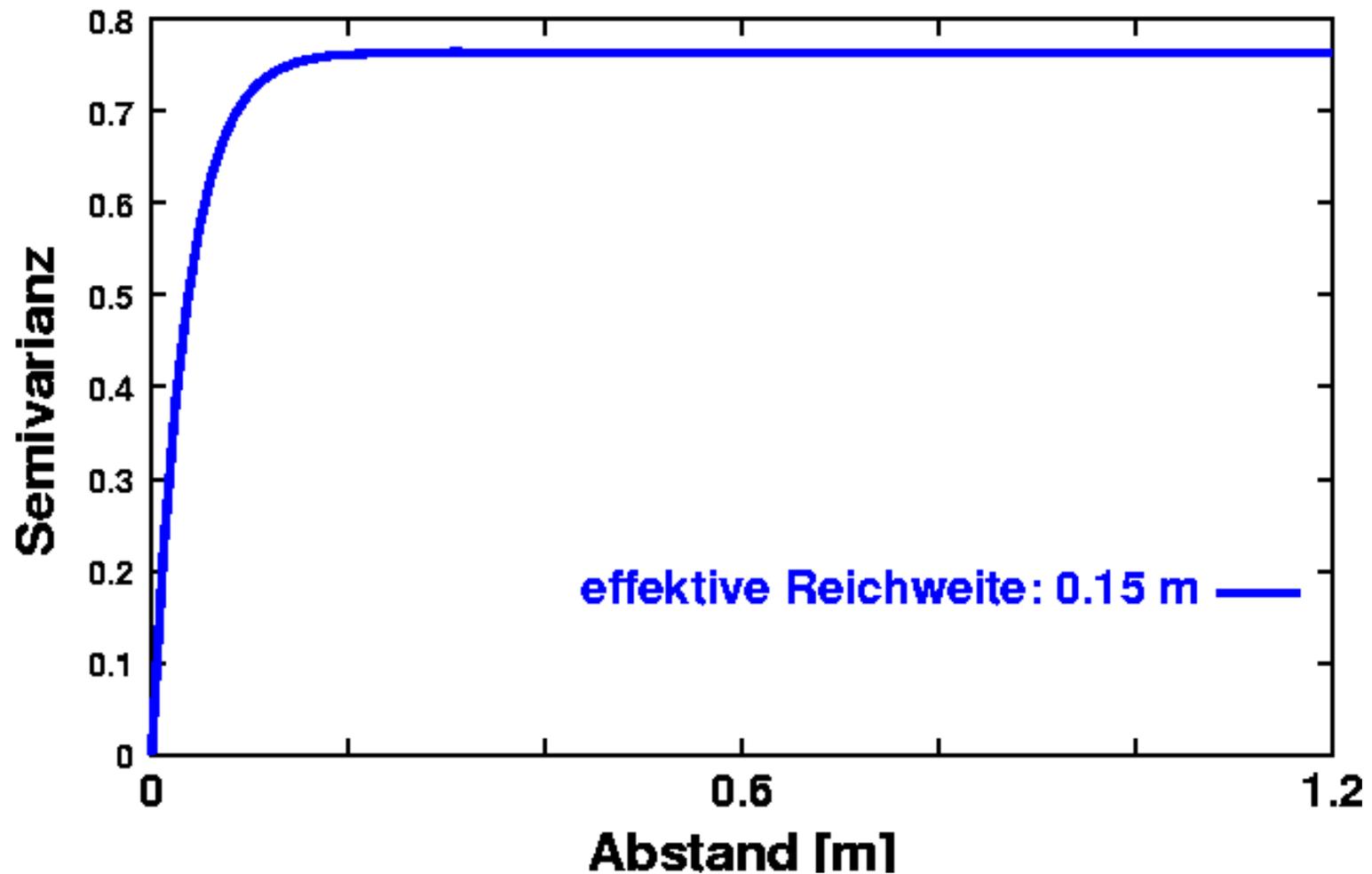
RNS 2



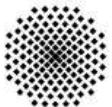
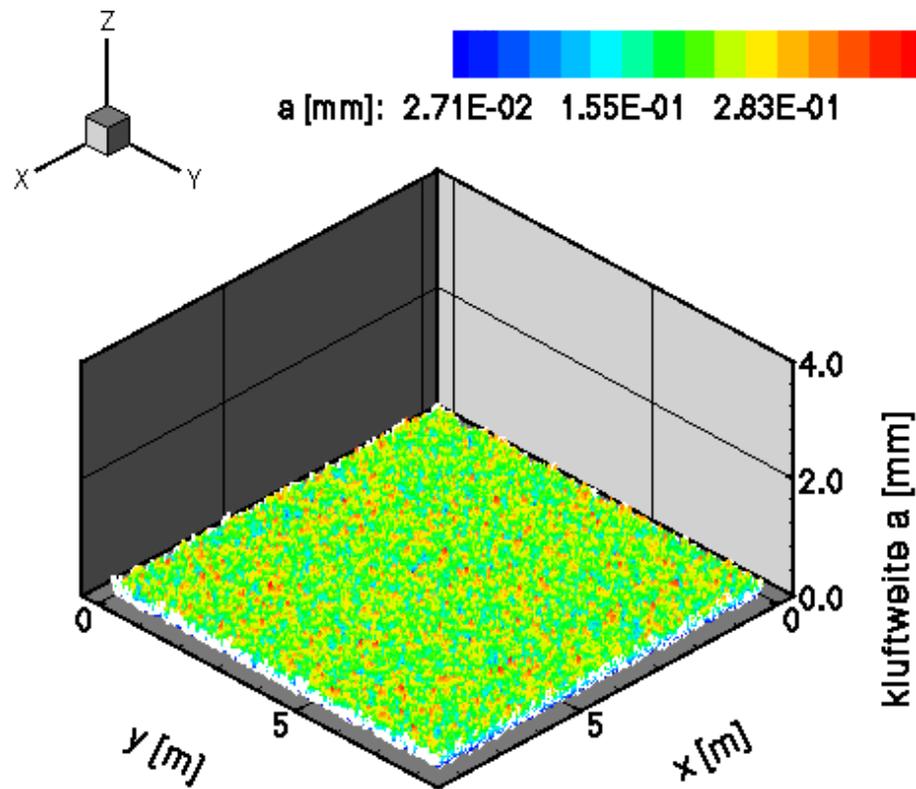
Renormalisierung



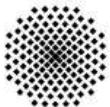
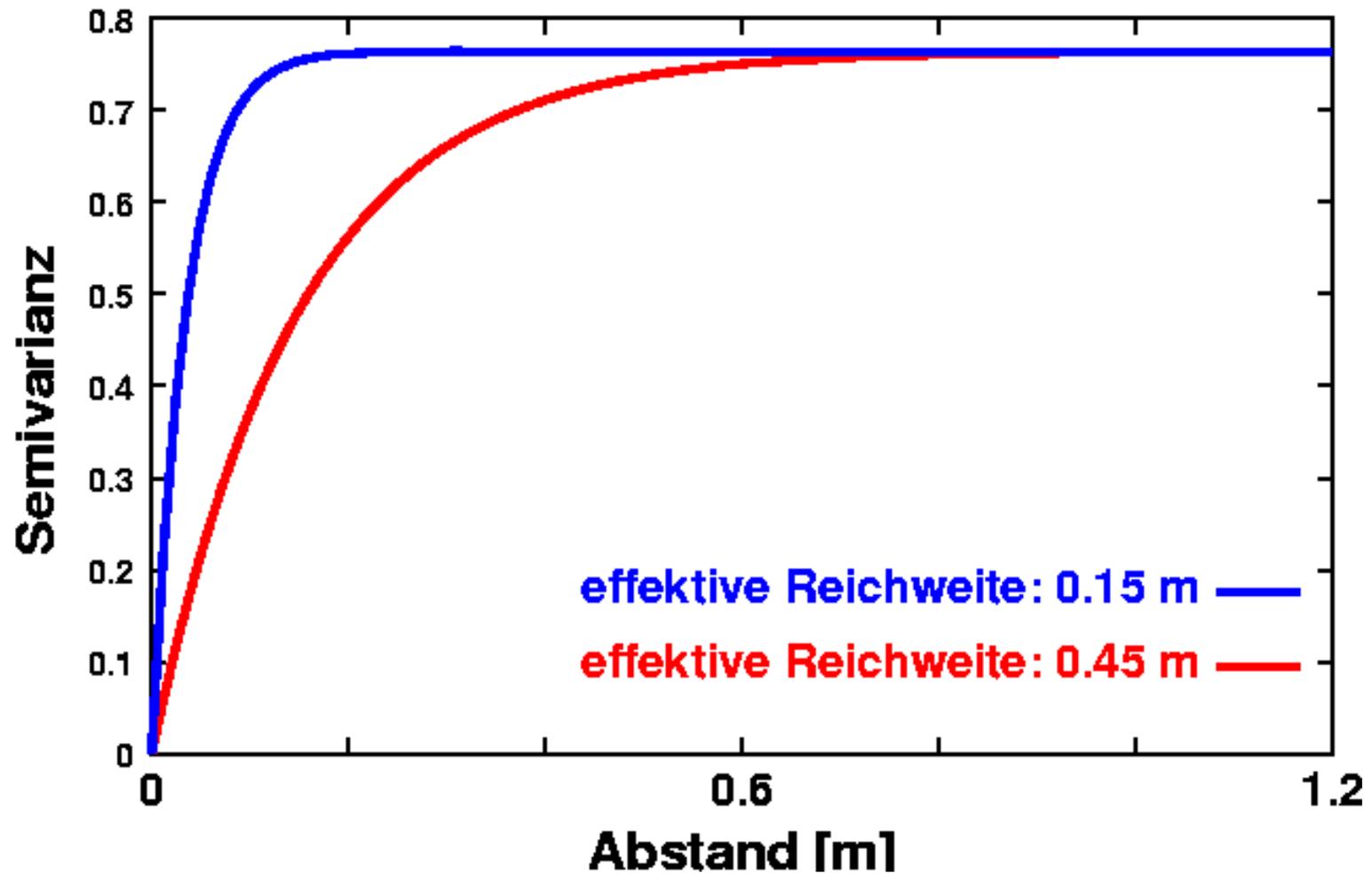
Renormalisierung: Verwendete Semivariogramme



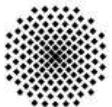
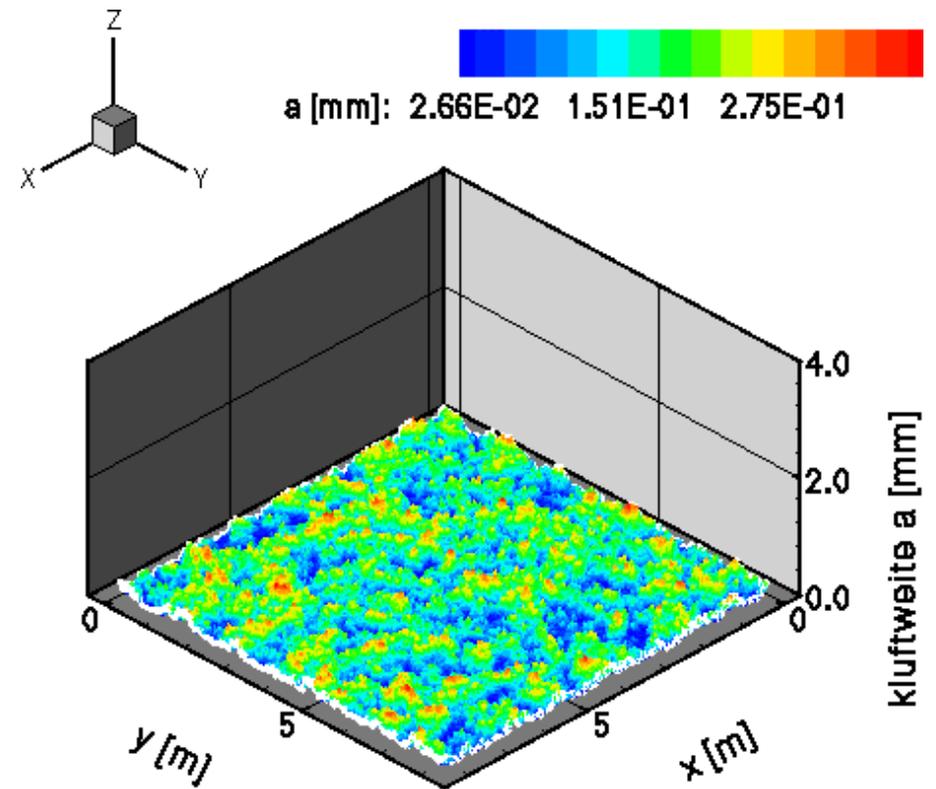
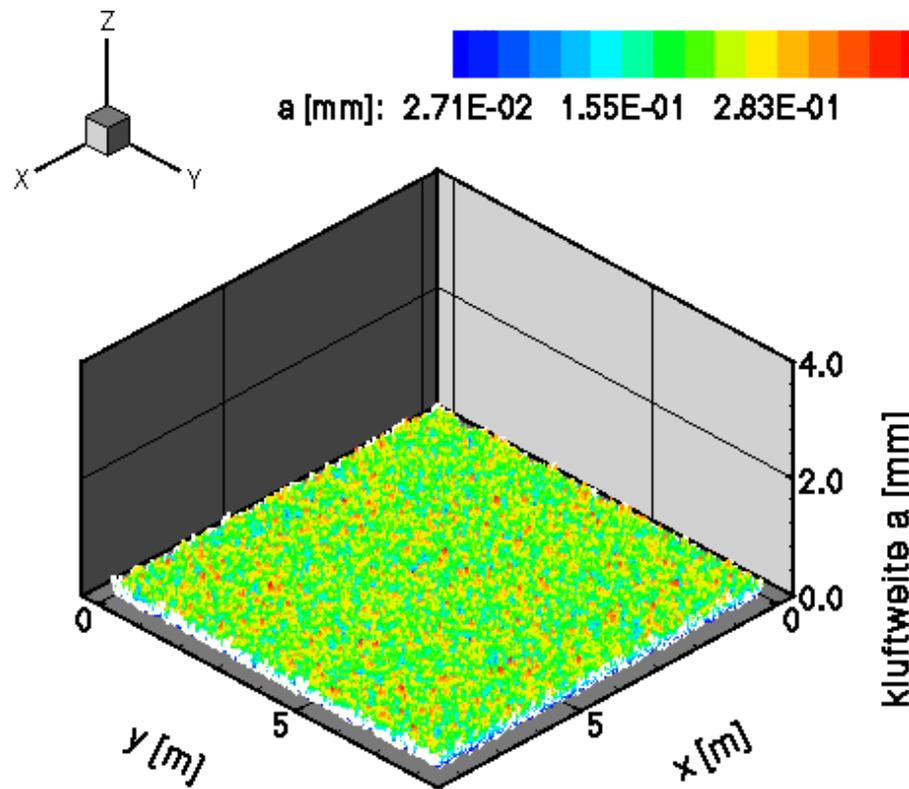
Renormalisierung: Gebiete



Renormalisierung: Verwendete Semivariogramme

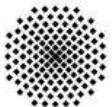
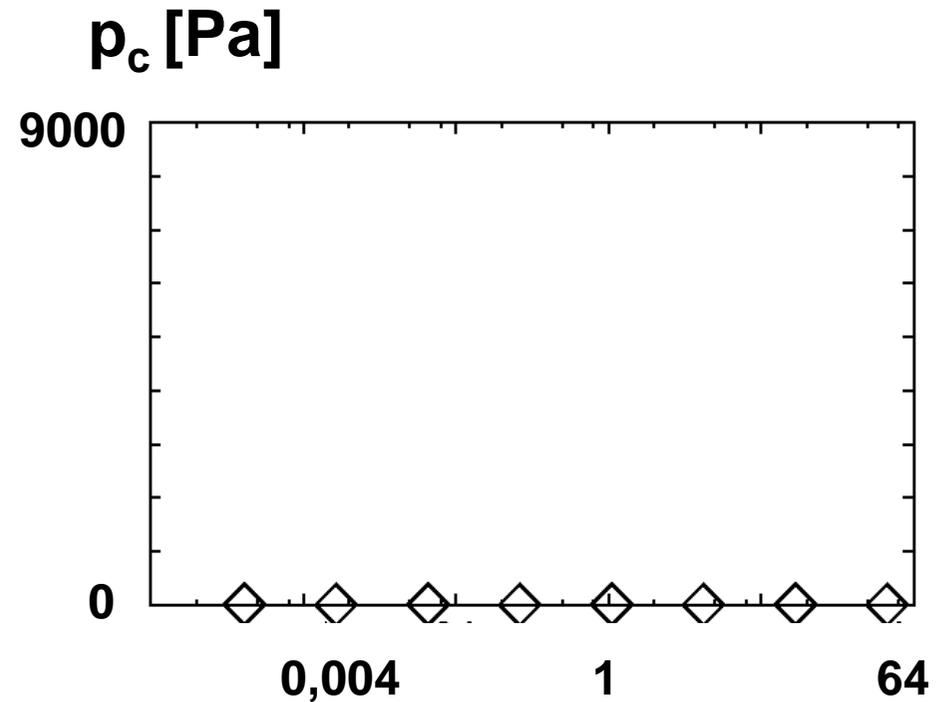
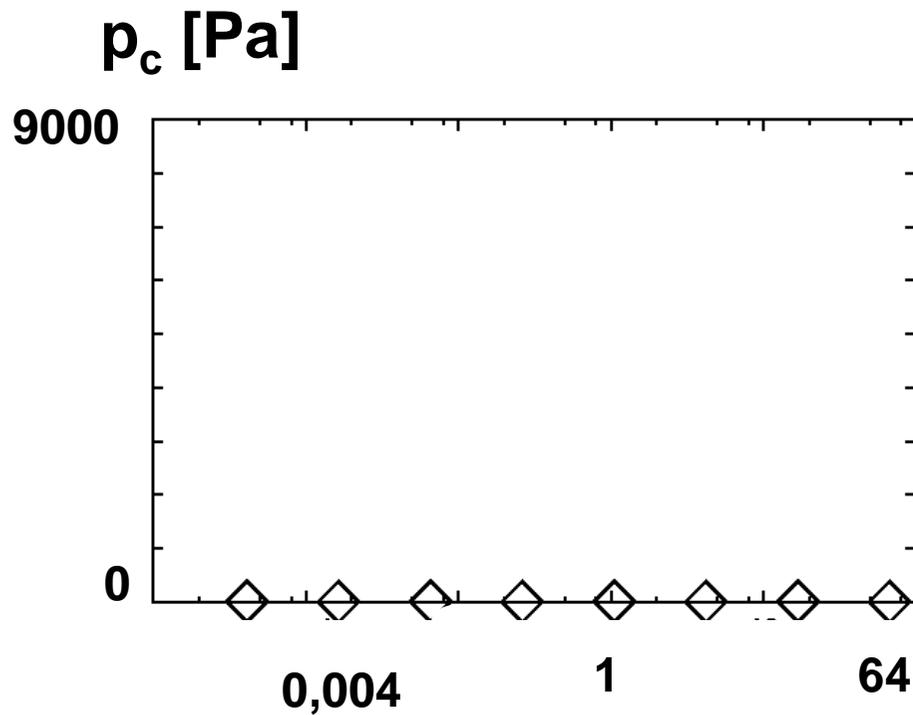


Renormalisierung: Gebiete



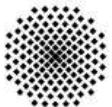
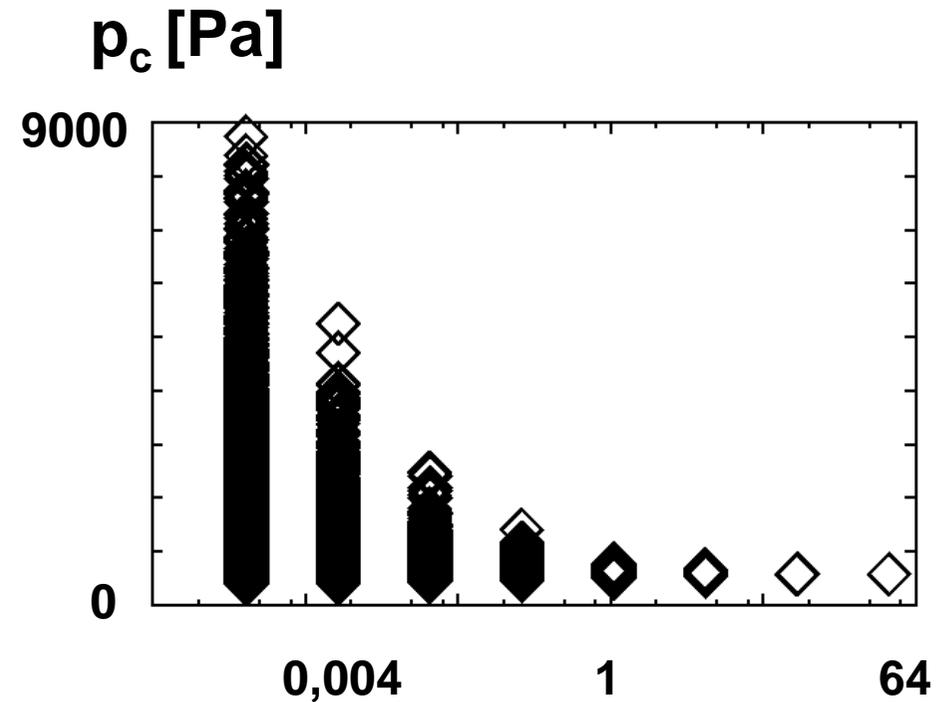
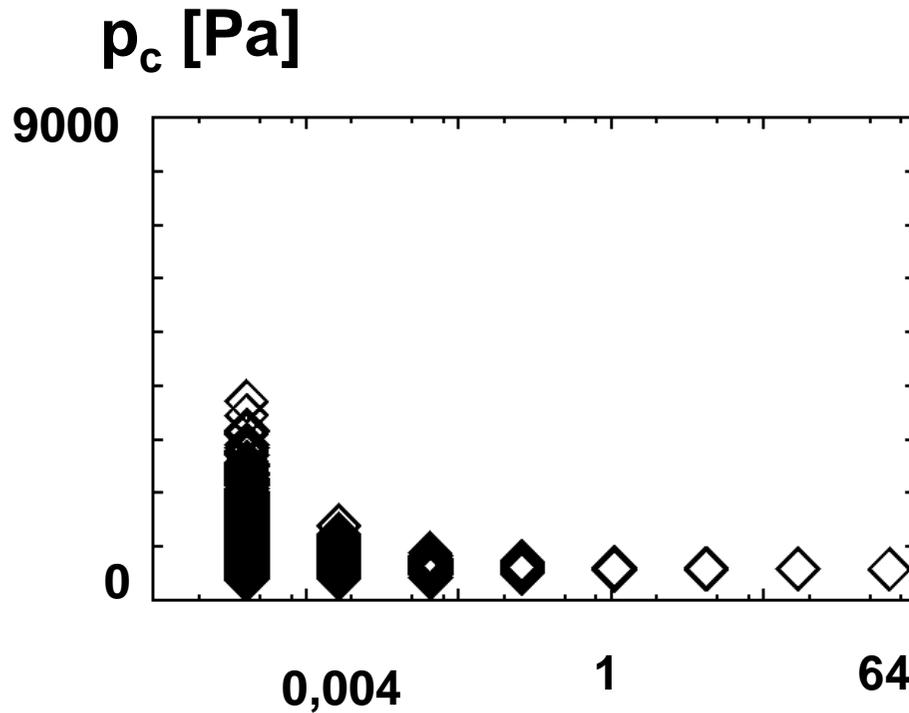
Renormalisierung: Kapillardruck

$$P = 1.450e5 \text{ Pa}, T = 298.1 \text{ K}, S_g = 0.0$$



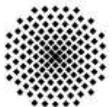
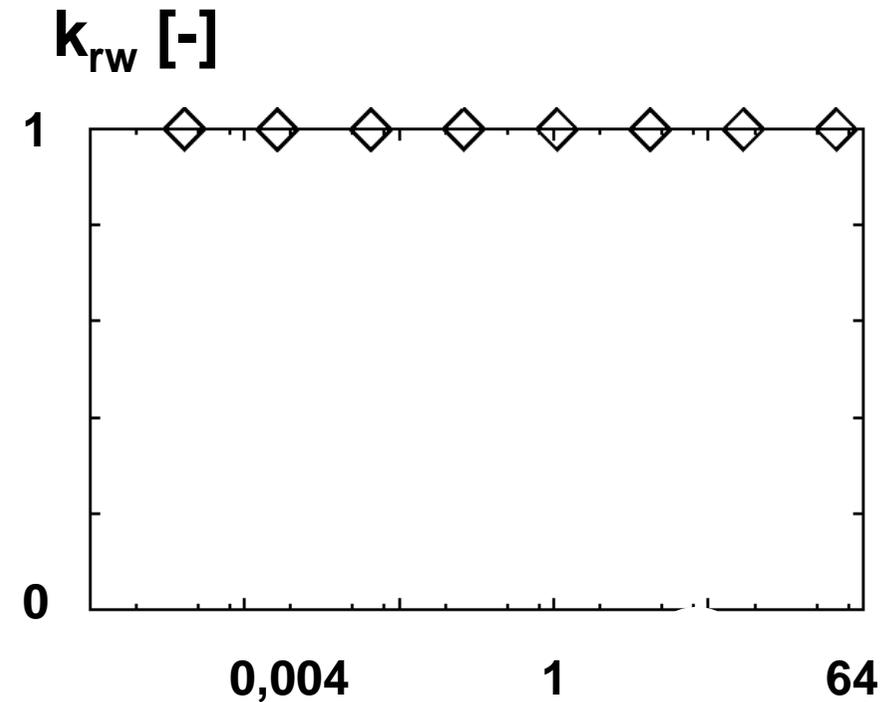
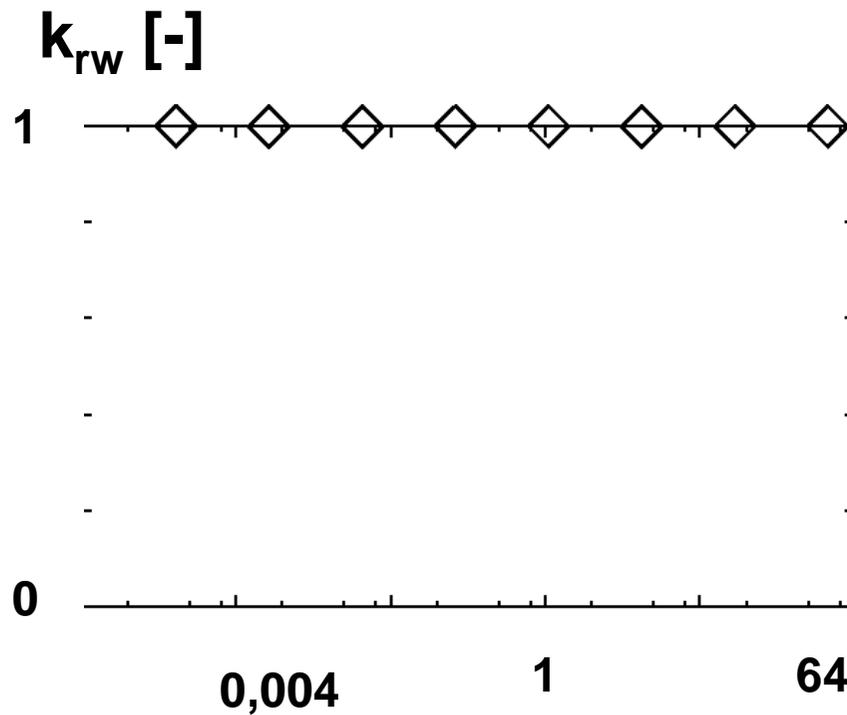
Renormalisierung: Kapillardruck

$P = 1.04 \times 10^5 \text{ Pa}$, $T = 298.1 \text{ K}$, $S_g = 0.0389$



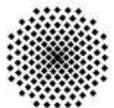
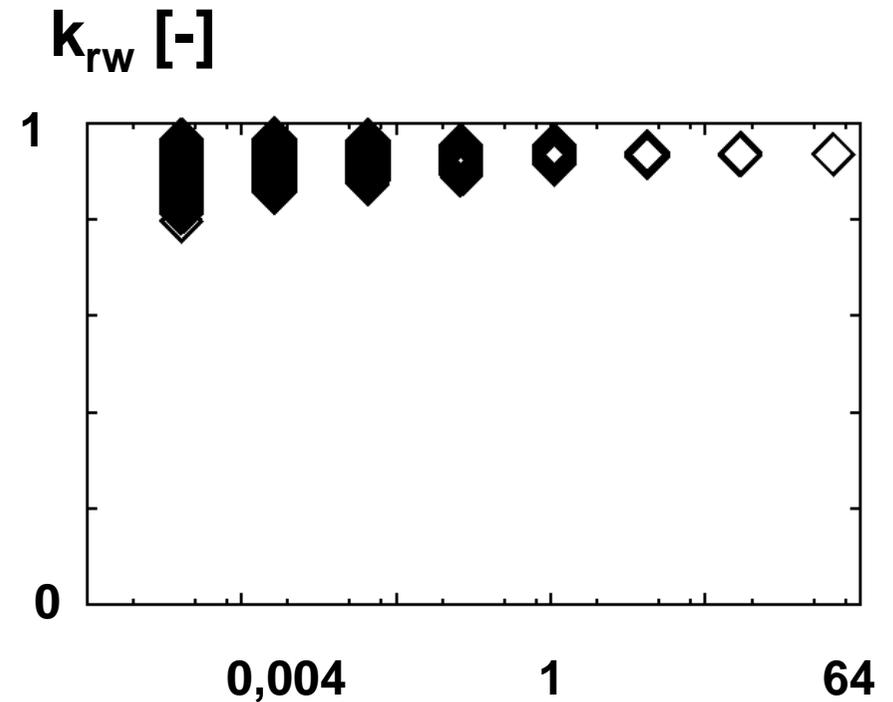
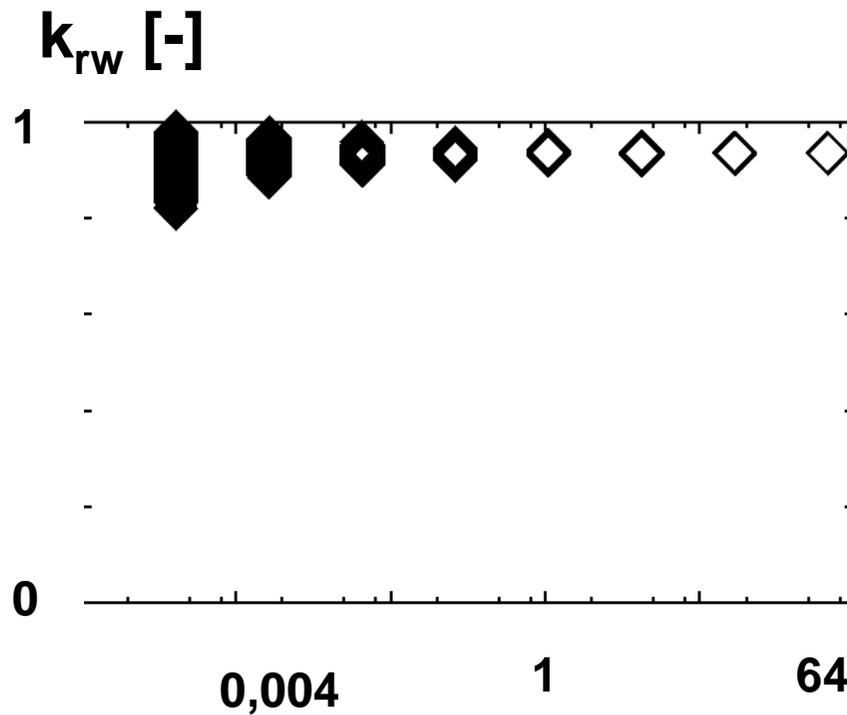
Renormalisierung: Relative Permeabilität

$P = 1.e450e5 \text{ Pa}$, $T = 298.1 \text{ K}$, $S_g = 0.0$



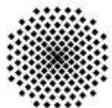
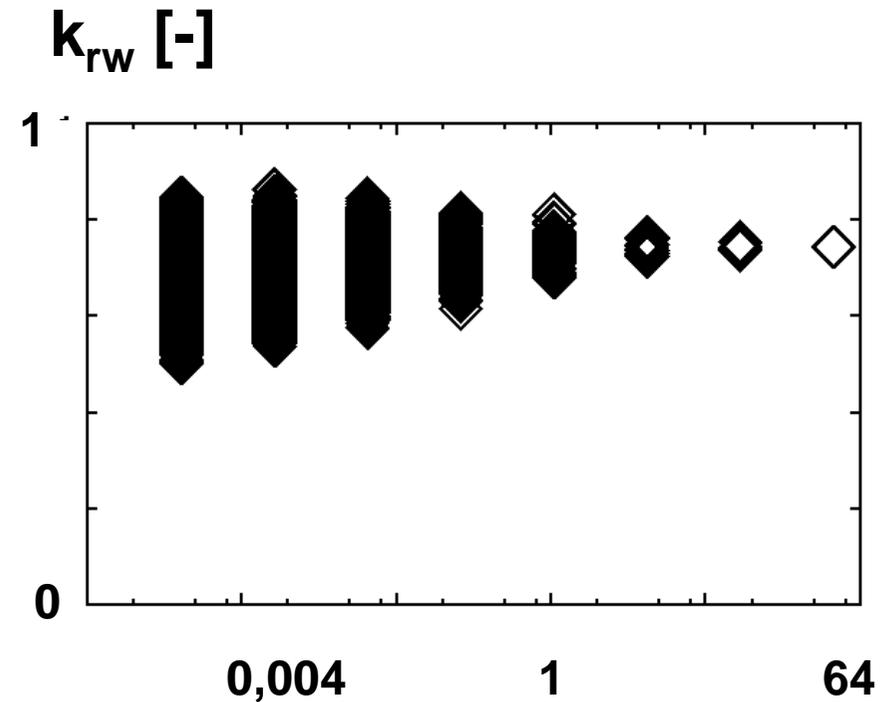
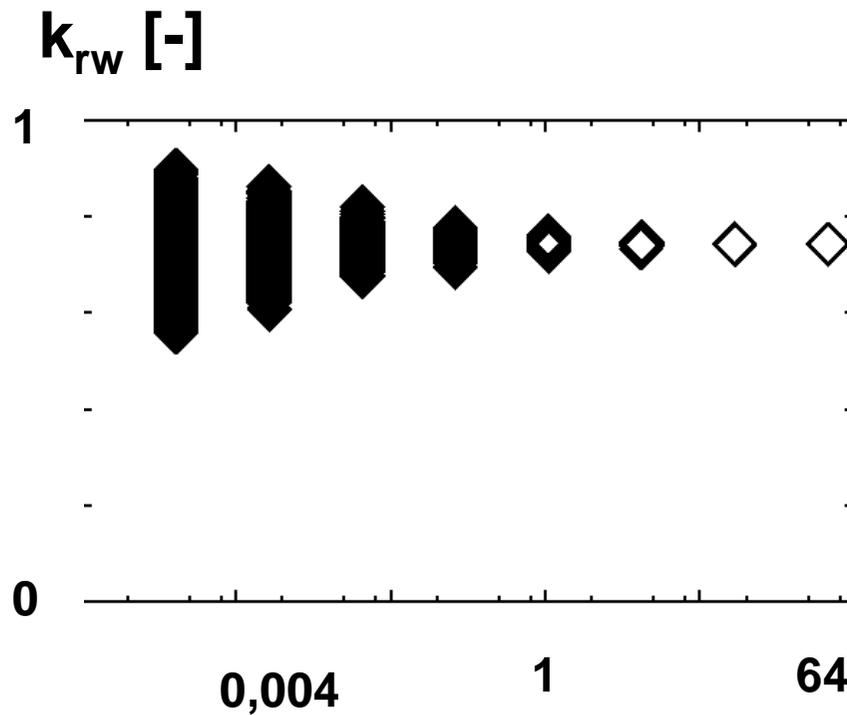
Renormalisierung: Relative Permeabilität

$P = 1.04 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, $T = 298.1 \text{ K}$, $S_g = 0.0389$



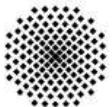
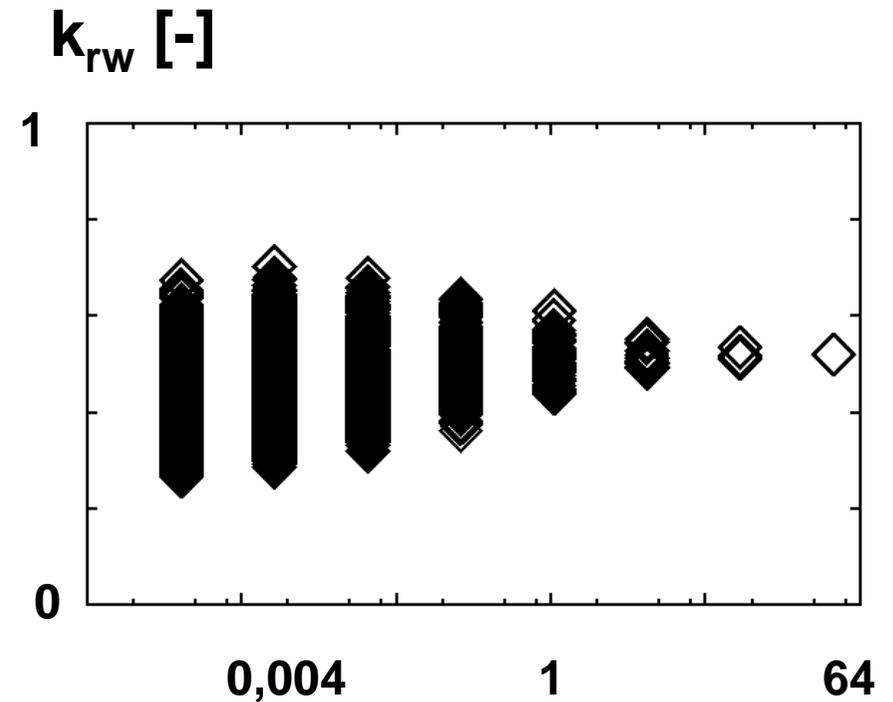
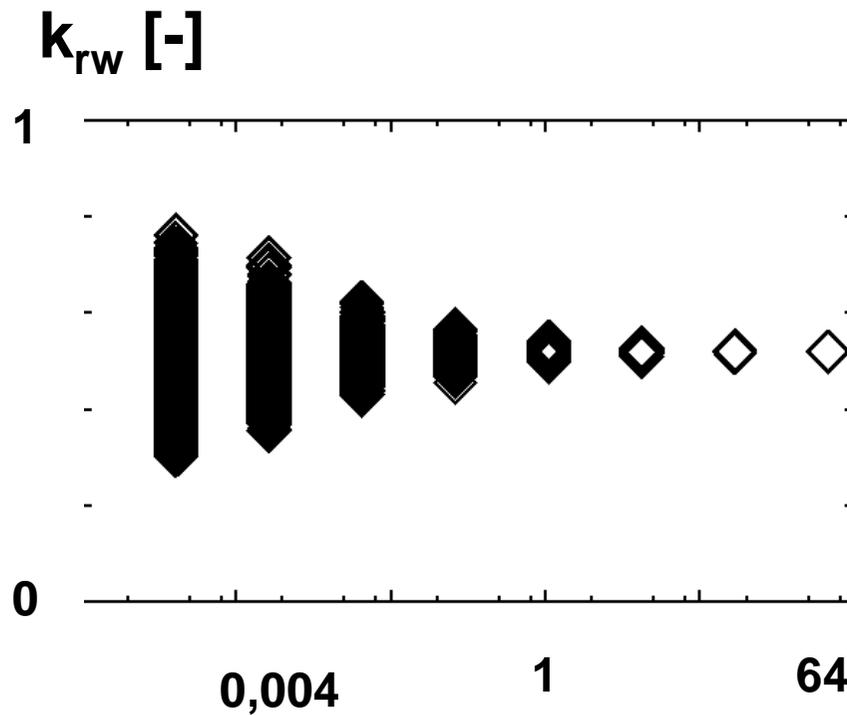
Renormalisierung: Relative Permeabilität

$P = 1.159e5 \text{ Pa}$, $T = 298.1 \text{ K}$, $S_g = 0.1513$



Renormalisierung: Relative Permeabilität

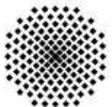
$P = 1.013e5 \text{ Pa}$, $T = 298.1 \text{ K}$, $S_g = 0.297$



Renormalisierung: Ergebnis

Die Varianz der upgescalten Parameter hängt...

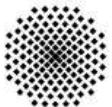
- von der geometrischen Struktur ab.
- vom Prozesszustand ab.
- nimmt mit zunehmender Mittelungsfläche ab, wenn die Mittelungsfläche größer als die effektive Länge zum Quadrat ist.



Renormalisierung: Ergebnis

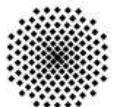


Die Mittelung der Parameter über ein repräsentatives Elementarvolumen ist für den hier dargestellten Entgasungsvorgang gerechtfertigt.

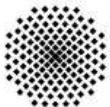
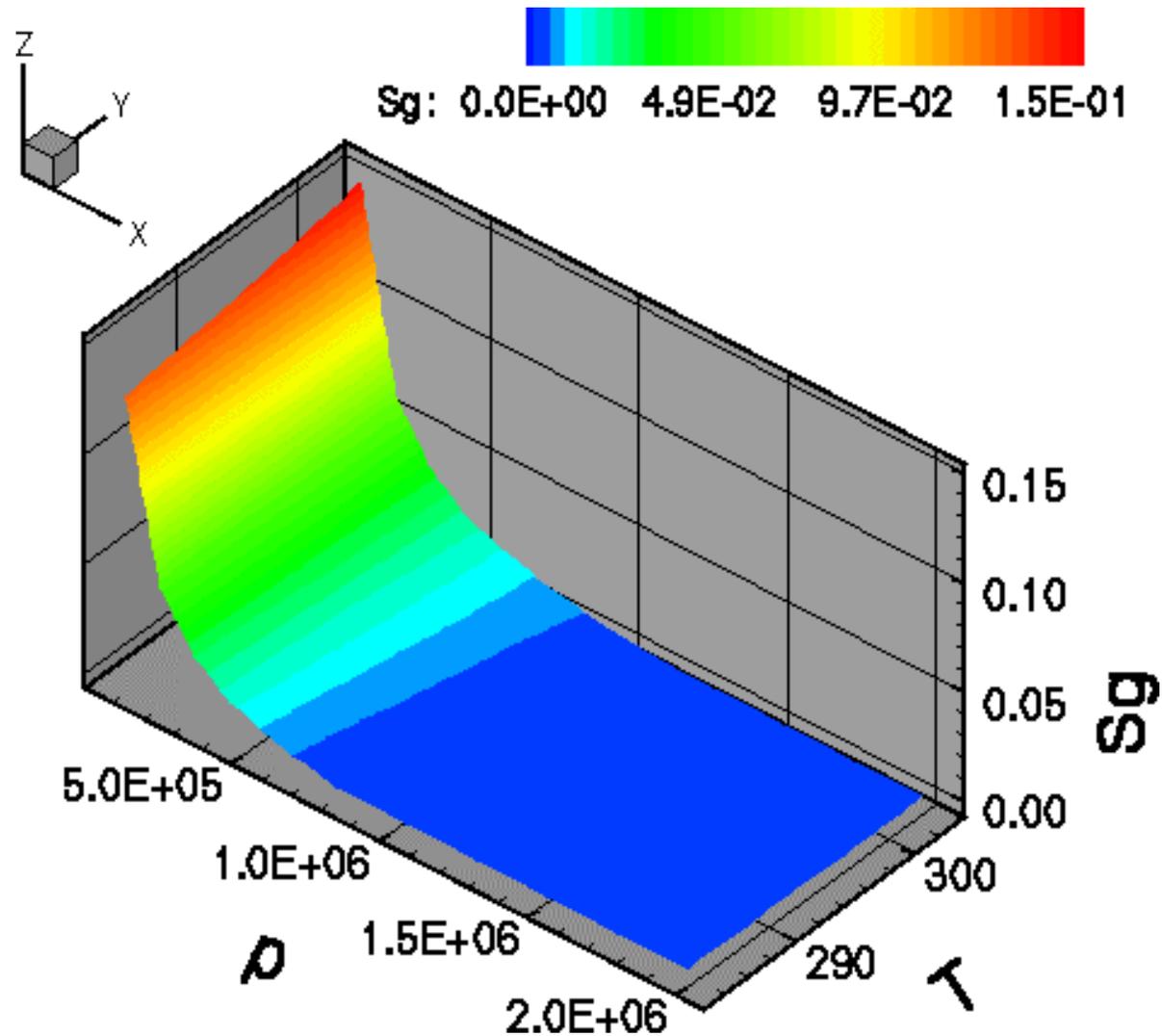


Gliederung des Vortrags

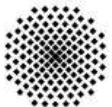
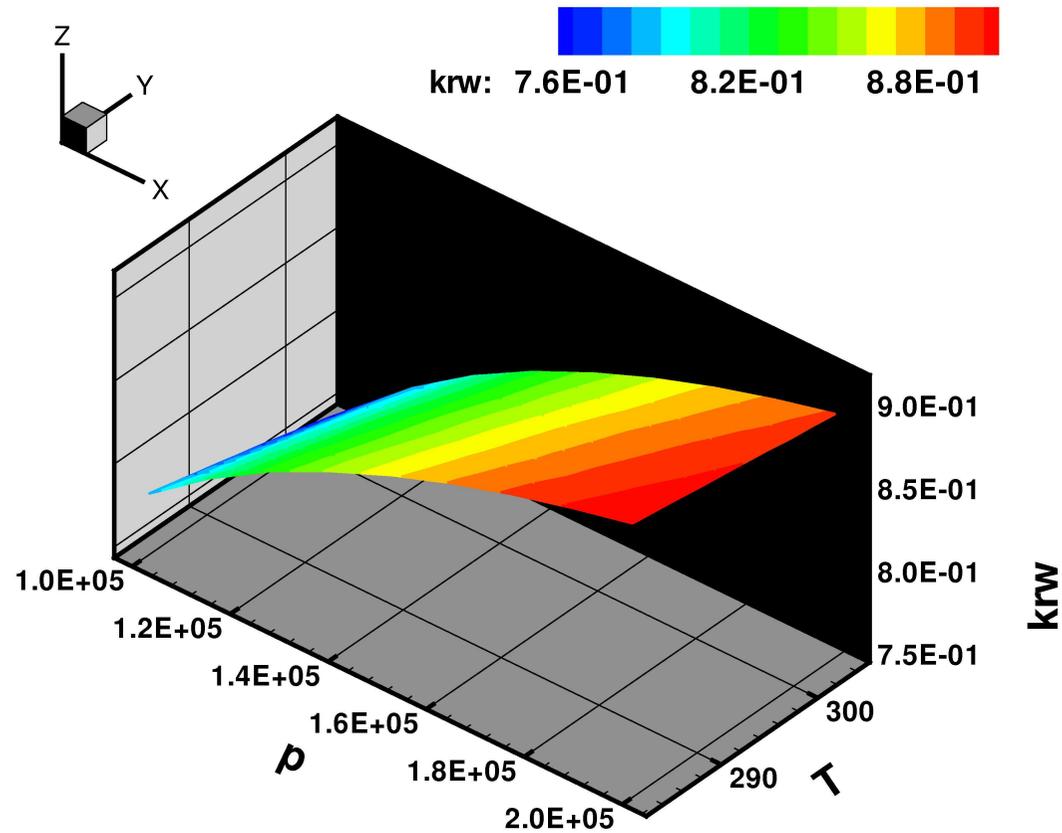
1. Entgasung in der Nähe von Endlagern
2. Einordnung des Problems
3. Erfassung der Entgasung auf der Mikroskala
4. Upscaling der Parameter auf die Makroskala
5. Homogenisierung mittels Renormalisierung
6. Erfassung der Entgasung auf der Makroskala
7. Zusammenfassung und Ausblick



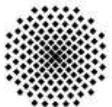
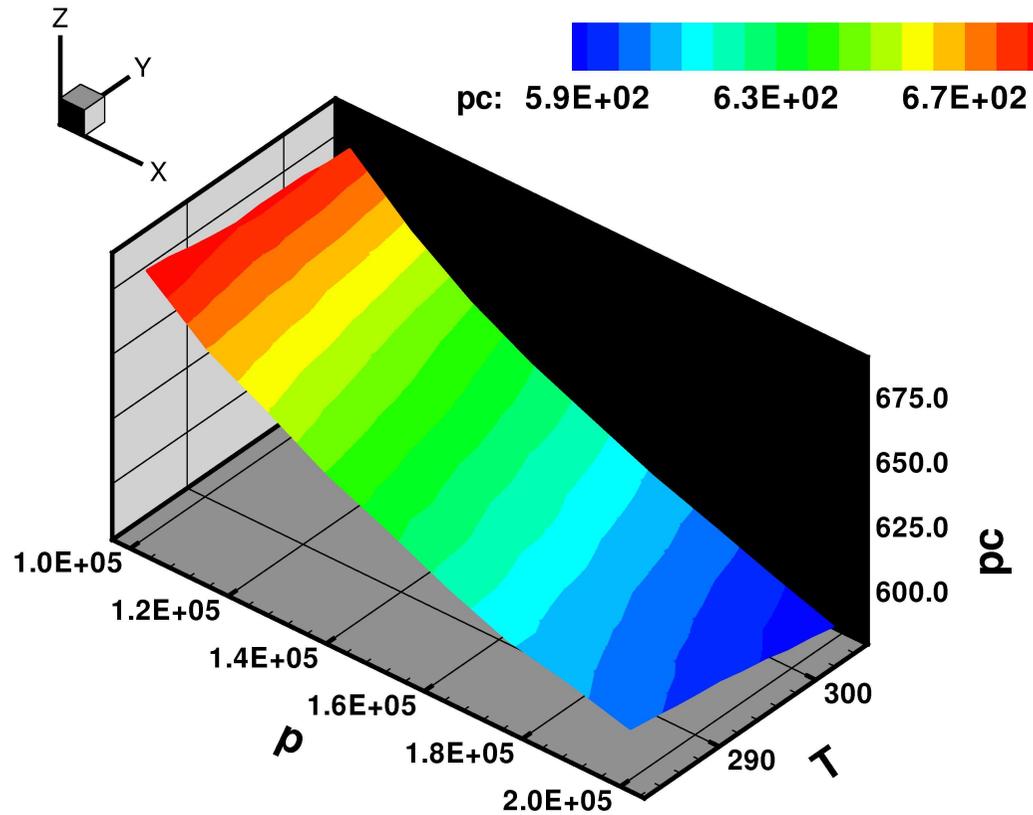
Gassättigung



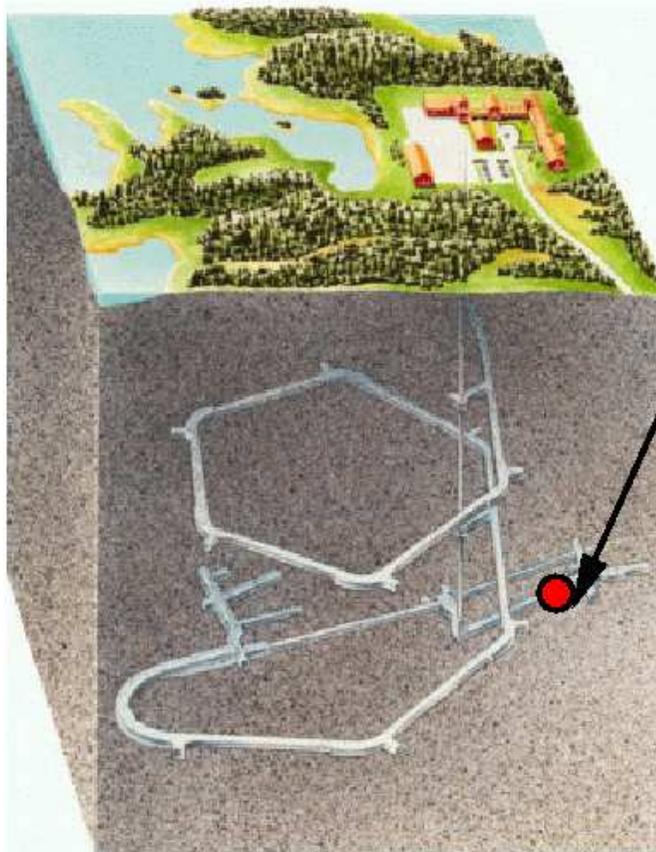
Relative Permeabilität der Wasserphase



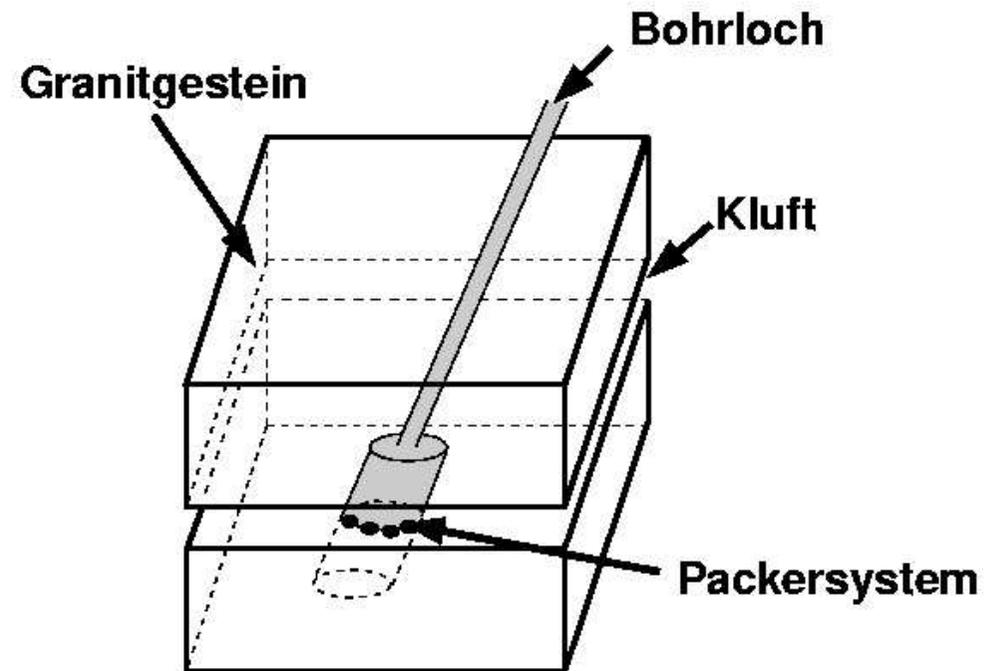
Kapillardruck



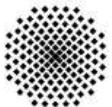
Feldversuch: Standort



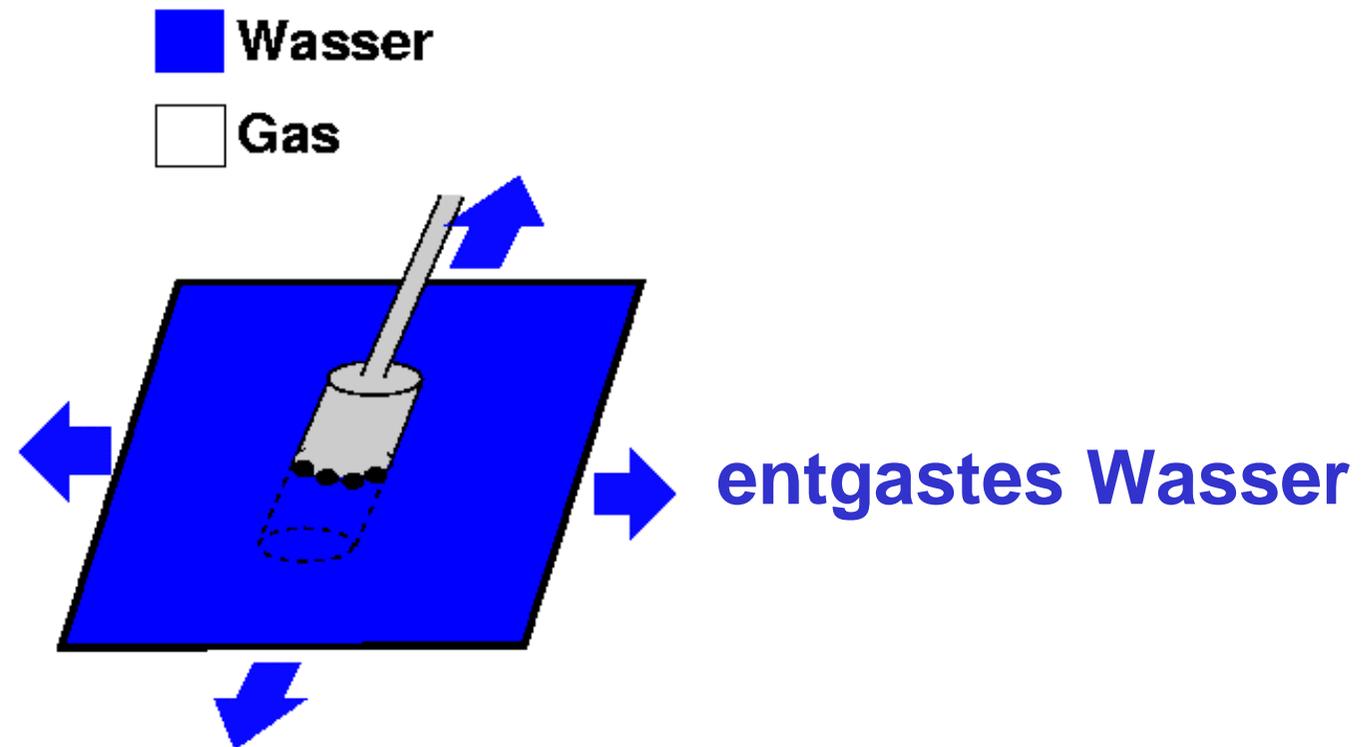
Versuchsstandort



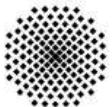
J. Jarsjö, G. Destouni, WRR, 2000



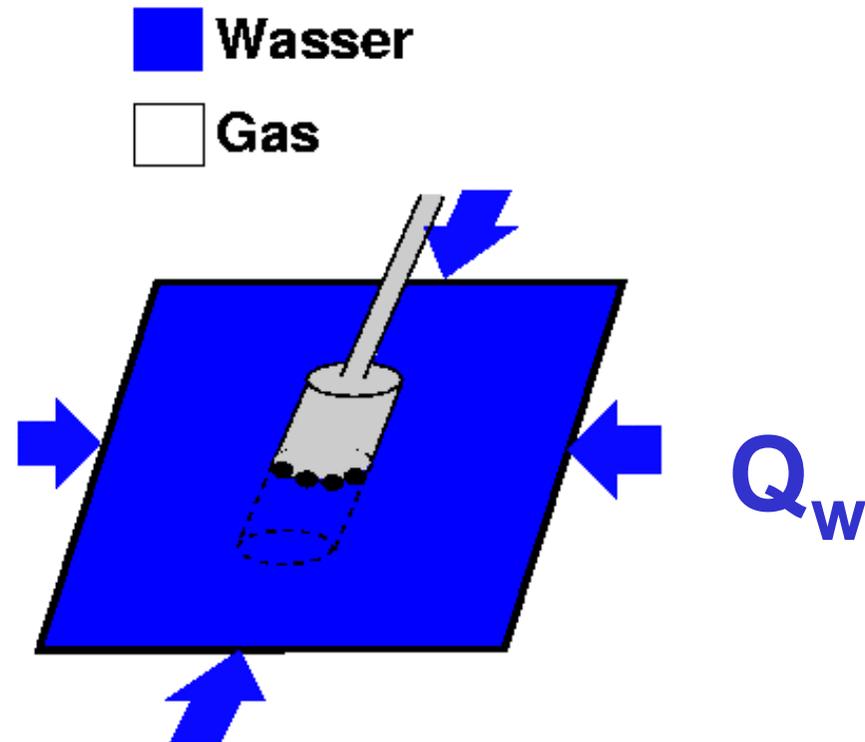
Feldversuch: Durchführung



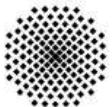
1.) Flutung der Kluft mit „entgastem“ Wasser



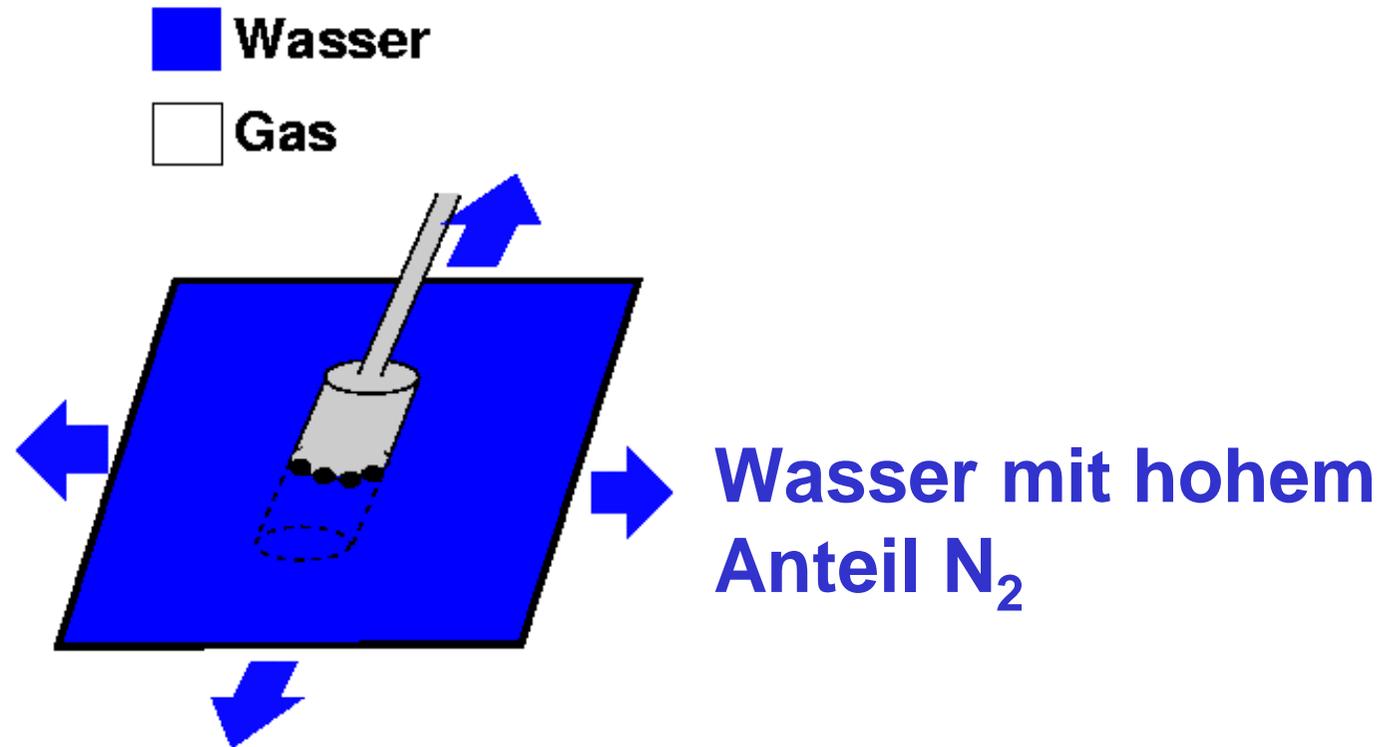
Feldversuch: Durchführung



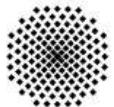
2.) Messung der Flussrate



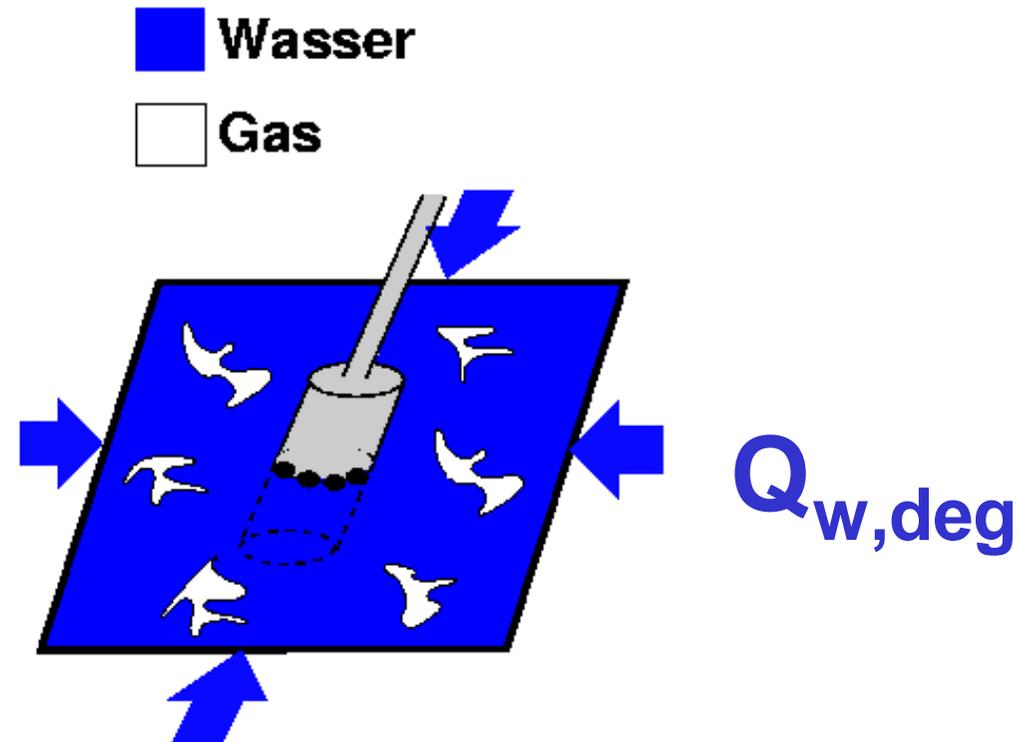
Feldversuch: Durchführung



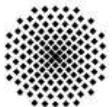
2.) Flutung der Kluft mit Wasser mit bekanntem Anteil N_2



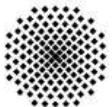
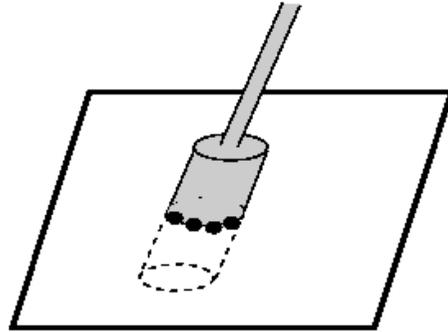
Feldversuch: Durchführung



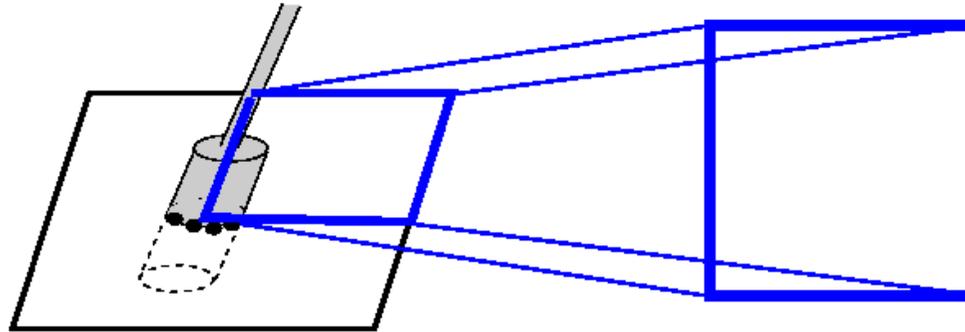
2.) Messung der Flussrate für entgasten Zustand



Simulation des Feldversuchs

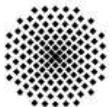


Simulation des Feldversuchs

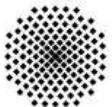
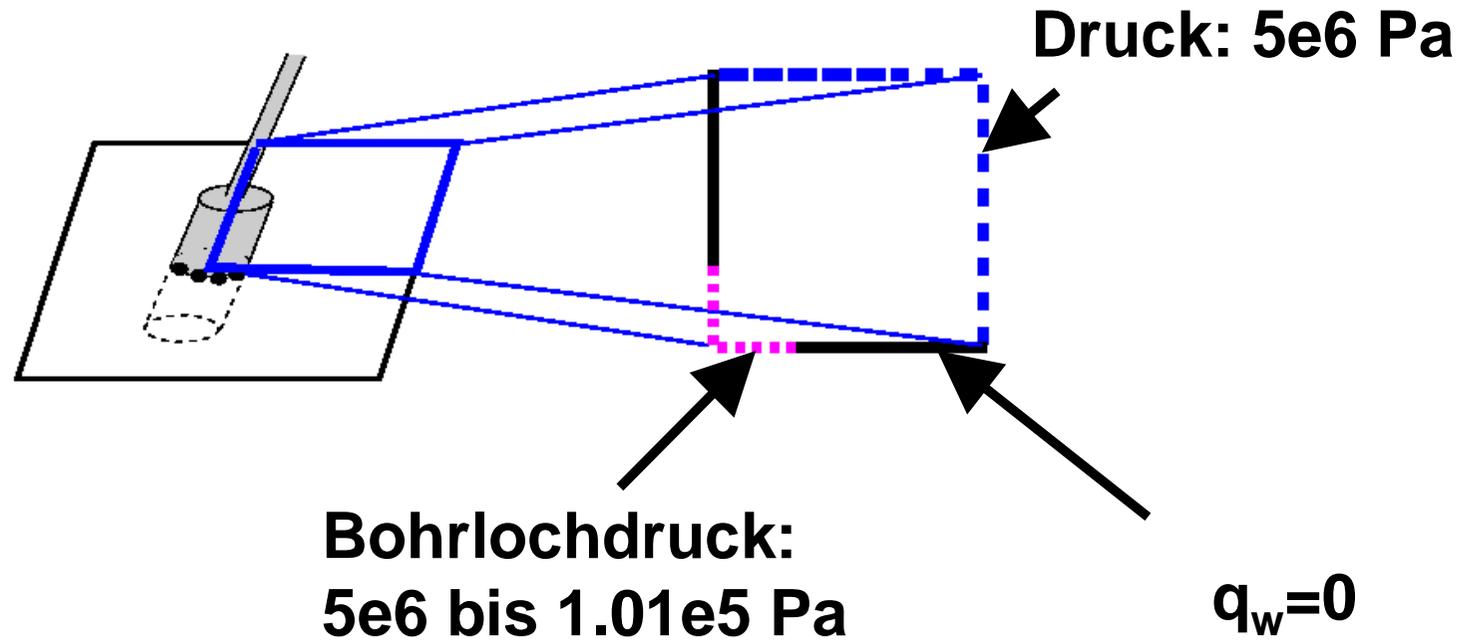


$$K_{\text{eff}} = 8.9\text{e-}9 \text{ m}^2$$

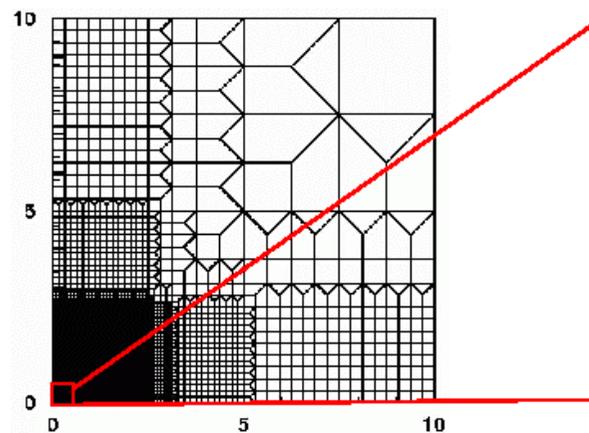
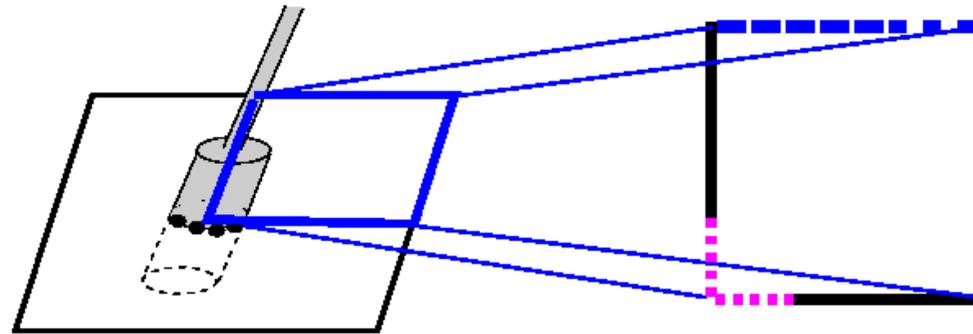
$$T = 290 \text{ K}$$



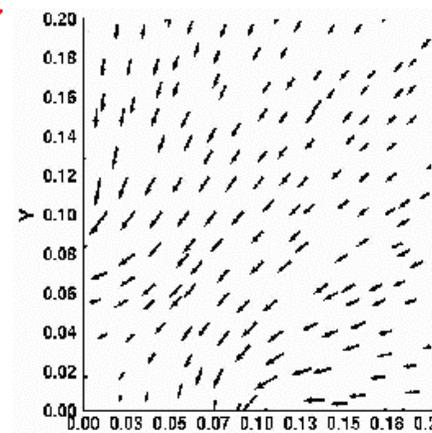
Simulation Feldversuch: Randbedingungen



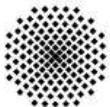
Feldversuch: Durchführung



Netz

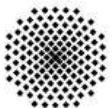
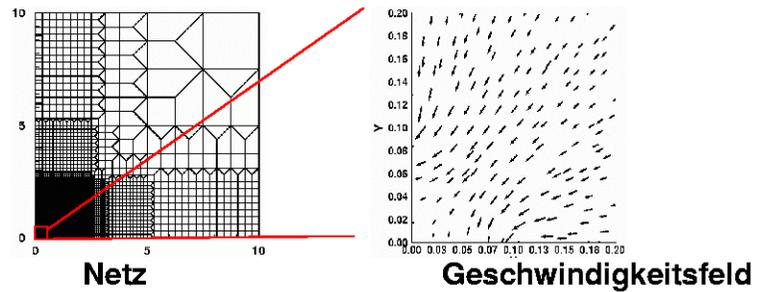
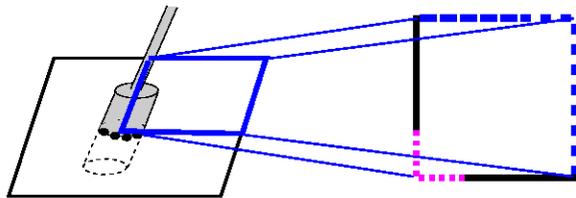


Geschwindigkeitsfeld



Feldversuch: Ergebnis

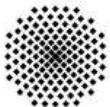
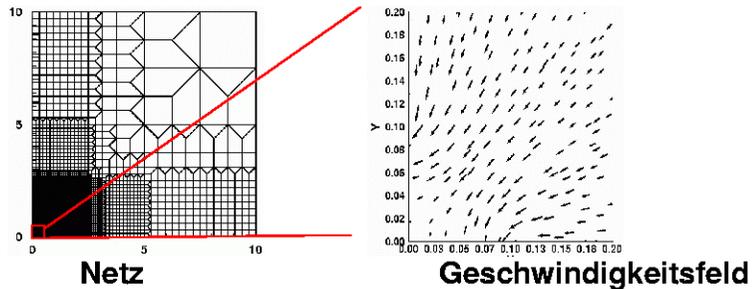
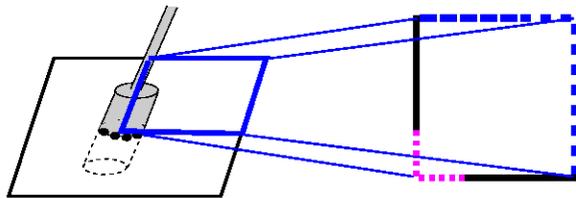
Reduzierung des Wasserflusses aufgrund der Entgasung:



Feldversuch: Ergebnis

Reduzierung des Wasserflusses
aufgrund der Entgasung:

Experiment: 10 – 11 %

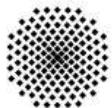
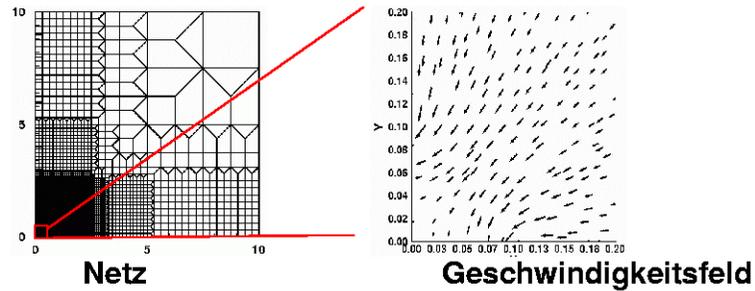
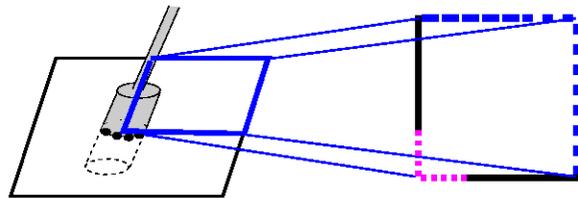


Feldversuch: Ergebnis

Reduzierung des Wasserflusses
aufgrund der Entgasung:

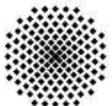
Experiment: 10 – 11 %

Simulation: 12.5 %



Gliederung des Vortrags

1. Entgasung in der Nähe von Endlagern
2. Einordnung des Problems
3. Erfassung der Entgasung auf der Mikroskala
4. Upscaling der Parameter auf die Makroskala
5. Homogenisierung mittels Renormalisierung
6. Erfassung der Entgasung auf der Makroskala
7. Zusammenfassung und Ausblick

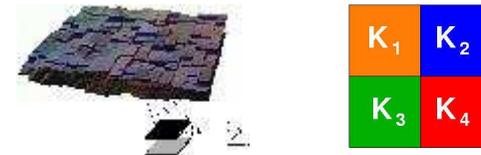


Zusammenfassung

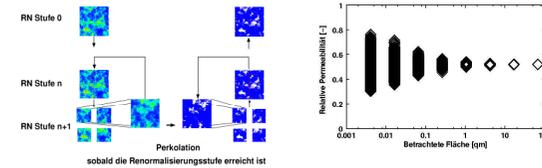
Simulation eines Laborexperiments



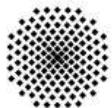
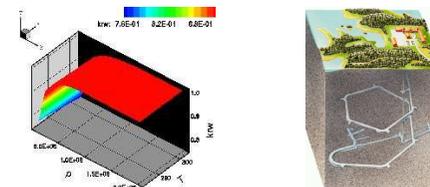
Upscaling der Parameter



Nachweis der Bildung eines REV

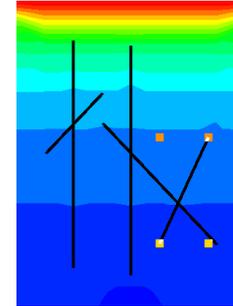


Simulation eines Feldexperiments

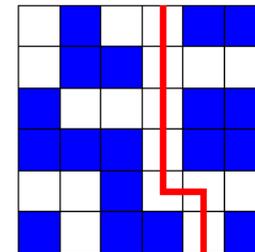


Ausblick

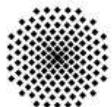
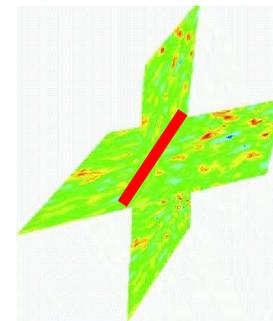
Validierungsbeispiel für
Zwei-Phasen-Zwei-Komponenten-Modell



Gasmobilisierung bei höheren Temperaturen
→ Kombination mit einem
Invasions-Perkulationsmodell



Genauere Betrachtung von
Kluftüberschneidungen



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

