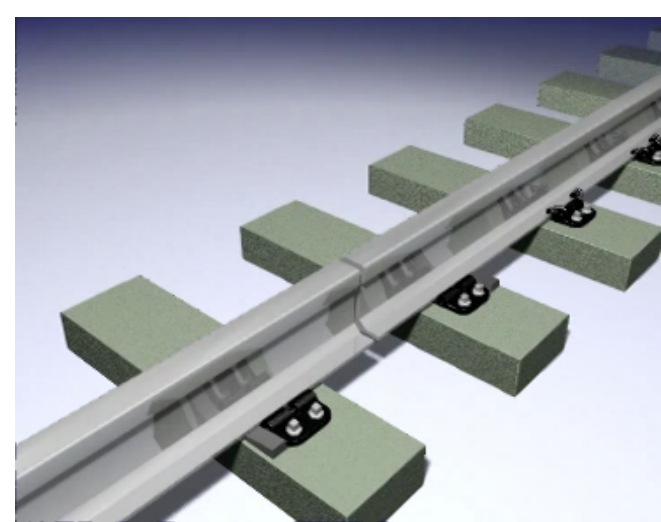


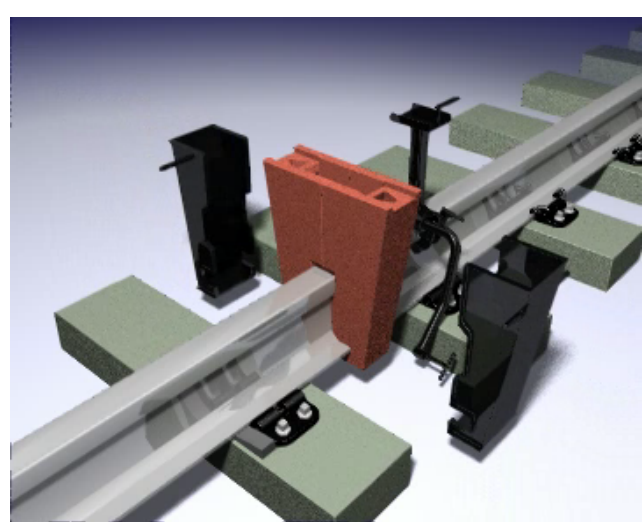
Analyse der Tiegelausströmung beim Aluminothermischen Schweißen:
Von analogen Laborversuchen zu digitalen PrognosenR. G. Kewalramani^{1,2,*}, A. Jünger¹, I. Riehl^{1,2}, J. Hantusch³, T. M. Fieback^{1,2}¹ Professur für Technische Thermodynamik, Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik, TU Bergakademie Freiberg, Gustav-Zeuner-Str. 7, 09599 Freiberg, Sachsen, Deutschland² Zentrum für effiziente Hochtemperatur-Stoffwandlung, TU Bergakademie Freiberg, Winklerstr. 5, 09599 Freiberg, Sachsen, Deutschland³ Elektro-Thermit GmbH & Co. KG, A Goldschmidt Company, Chemiestr. 24, 06132 Halle (Saale), Sachsen-Anhalt, Deutschland

1. Das Aluminothermische (AT) Schweißverfahren

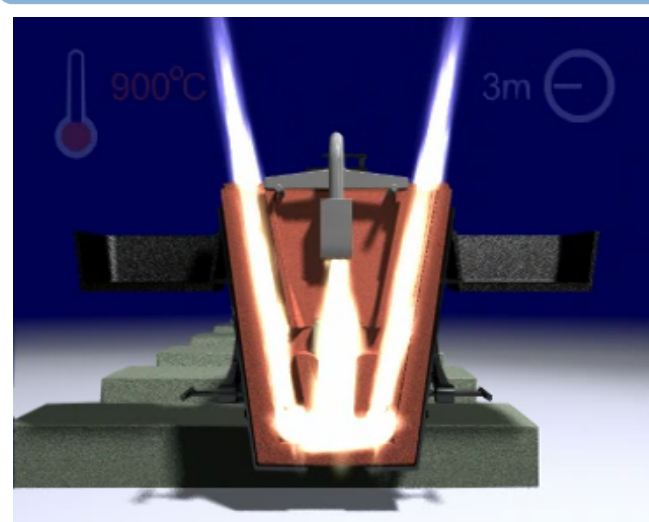
1. Schweißstücke



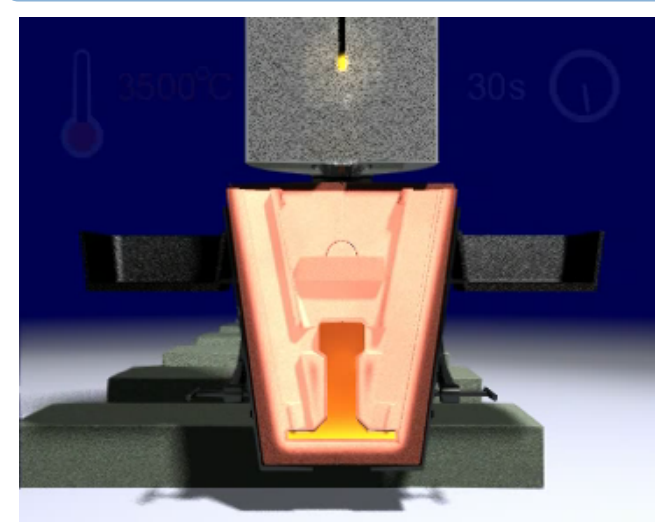
2. Gießform-Aufbau



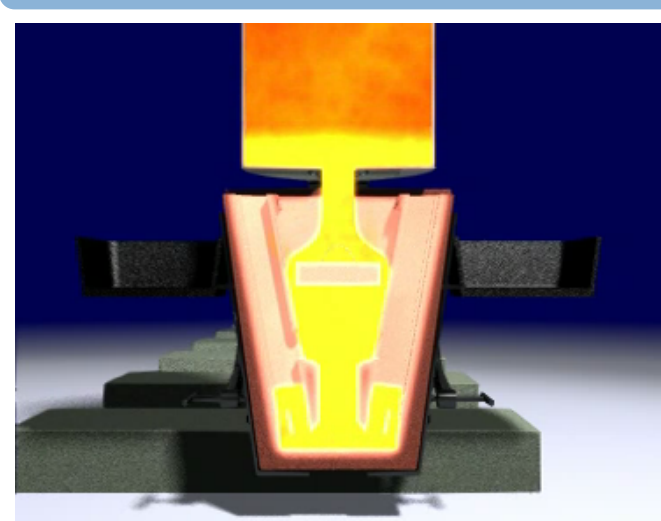
3. Vorwärmung



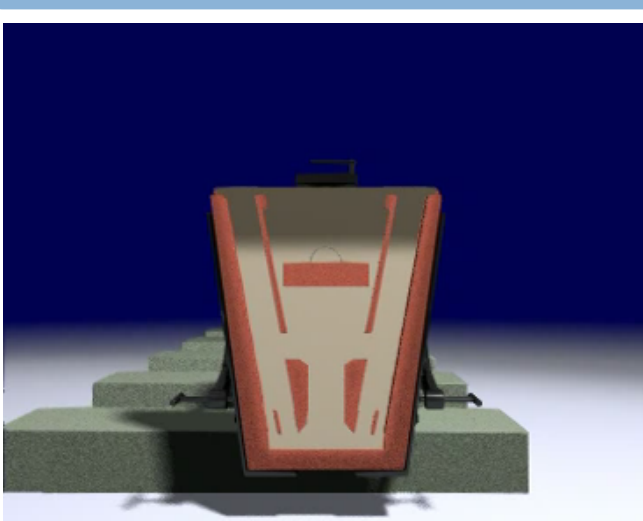
4. Thermit®-Reaktion



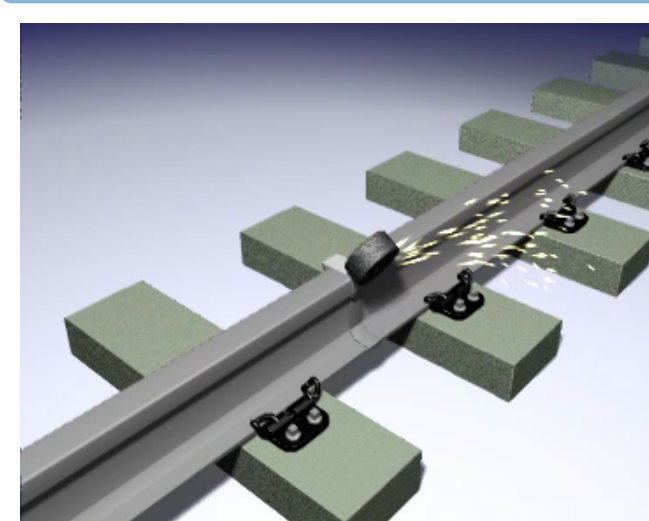
5. Formfüllung



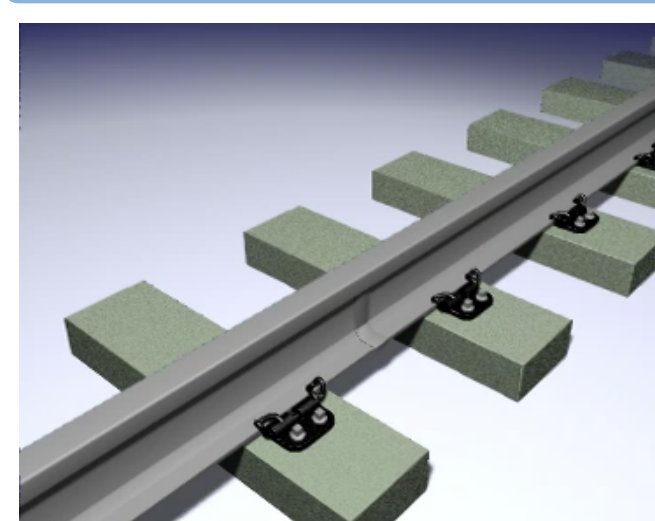
6. Erstarrung/Abkühlung



7. Schleifen



8. Endzustand



2. Motivation & Methodik

Motivation

- Das AT Schweißverfahren ist ein **bewährtes Verfahren** für die Verbindung von Schienen.
- Das Verfahren ähnelt einem **Gießvorgang**, bei dem geschmolzenes Metall aus dem Tiegel in eine (vorgeheizte) Form gegossen wird und anschließend erstarrt.
- Aufgrund **sehr hoher Temperaturen** (> 2000 °C) und des **opaken Schweißsystems** kann die **Dynamik** der Mehrphasenströmung **nicht** beobachtet werden.

Methodik

- Der Ausströmprozess wurde in einem Labormodell eines Reaktionstiegels untersucht, wobei **Wasser/Öl** (WO) als Analogfluide für **Stahl/Schlacke** (SS) dienen.
- Der **Reaktionstiegel aus Plexiglas®** ermöglichte visuelle Beobachtungen der Mehrphasenströmung von Wasser/Öl sowie eine vereinfachte Auswertung.
- Die **CFD Simulationen** wurden anhand der **Experimente mit dem Wasser/Öl-System** validiert.
- Anschließend wurden **Simulationen mit dem Stahl/Schlacke-System** durchgeführt, um das Strömungsverhalten im realen Ausströmprozess zu **prognostizieren**.

3. numerisches Modell

Erhaltungsgleichungen

➤ **Masse:**

$$\frac{\partial u_i^*}{\partial x_i^*} = 0 \quad (1)$$

➤ **Phasenanteil (VoF-Methode):**

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t^*} + \frac{\partial}{\partial x_i^*} (u_i^* \alpha) + \frac{\partial}{\partial x_i^*} (u_c^* \alpha [1 - \alpha]) = 0 \quad (2)$$

➤ **Impuls:**

$$\frac{\partial}{\partial t^*} (\rho^* u_i^*) + \frac{\partial}{\partial x_j^*} (\rho^* u_j^* u_i^*) = -\frac{\partial p^*}{\partial x_i^*} + \frac{1}{Re} \frac{\partial}{\partial x_i^*} \left(\mu^* \frac{\partial u_i^*}{\partial x_i^*} \right) + \frac{\rho^* b_i^*}{Fr^2} + \frac{1}{We} k^* \frac{\partial \alpha}{\partial x_i^*} \quad (3)$$

Ähnlichkeitskriterien

- **Reynolds-Zahl (Re):** Ähnlichkeit zwischen WO und SS ist erfüllt

$$\left(\frac{uD}{\nu} \right)_{WO} \approx \left(\frac{uD}{\nu} \right)_{SS} \quad (4)$$

$$u_{WO} \approx u_{SS}$$

- **Froude-Zahl (Fr):** Ähnlichkeit zwischen WO und SS ist erfüllt

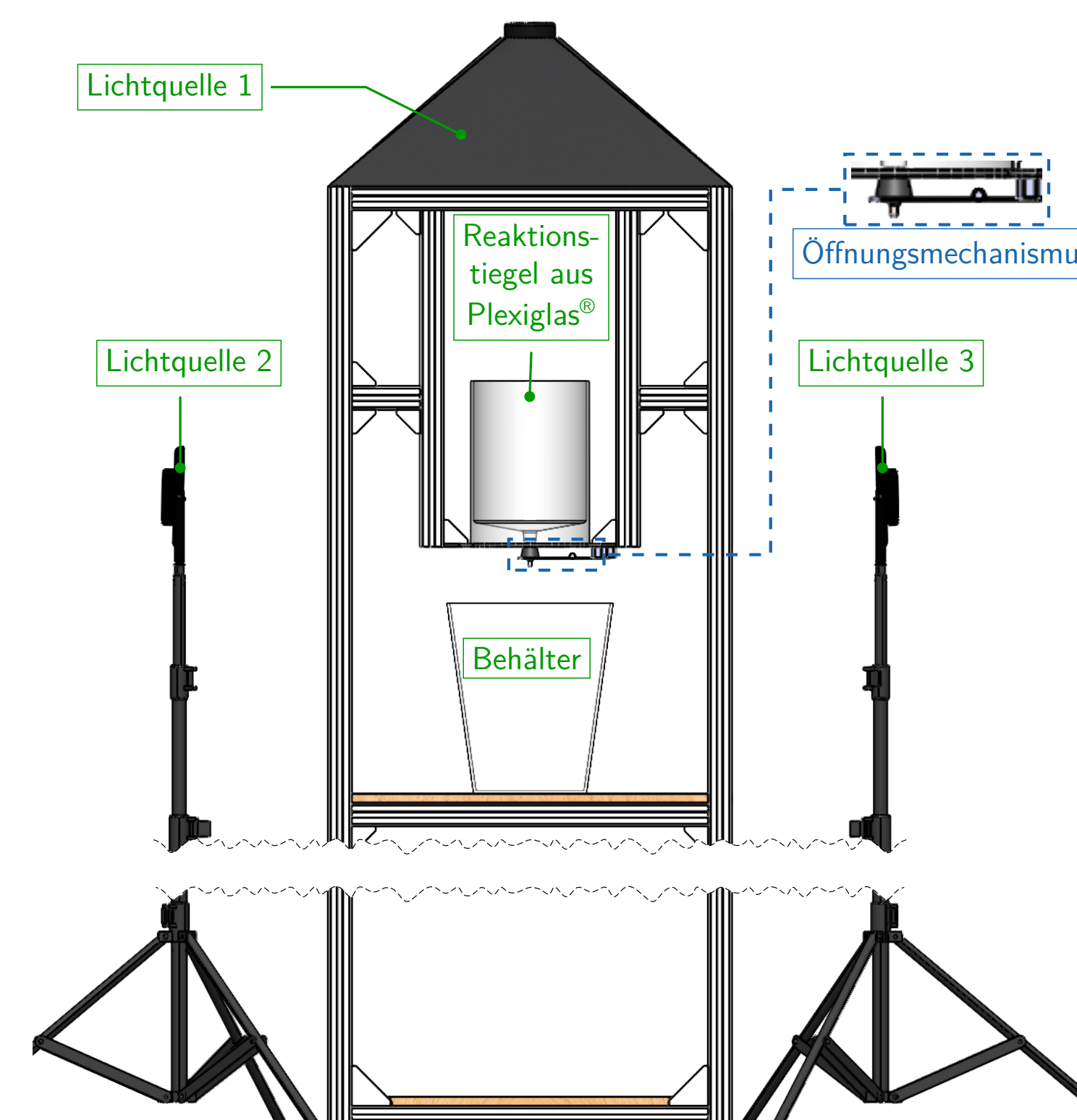
$$\left(\frac{u}{\sqrt{gD}} \right)_{WO} \approx \left(\frac{u}{\sqrt{gD}} \right)_{SS} \quad (5)$$

- **Weber-Zahl (We):** Ähnlichkeit zwischen WO und SS ist **nicht erfüllt**

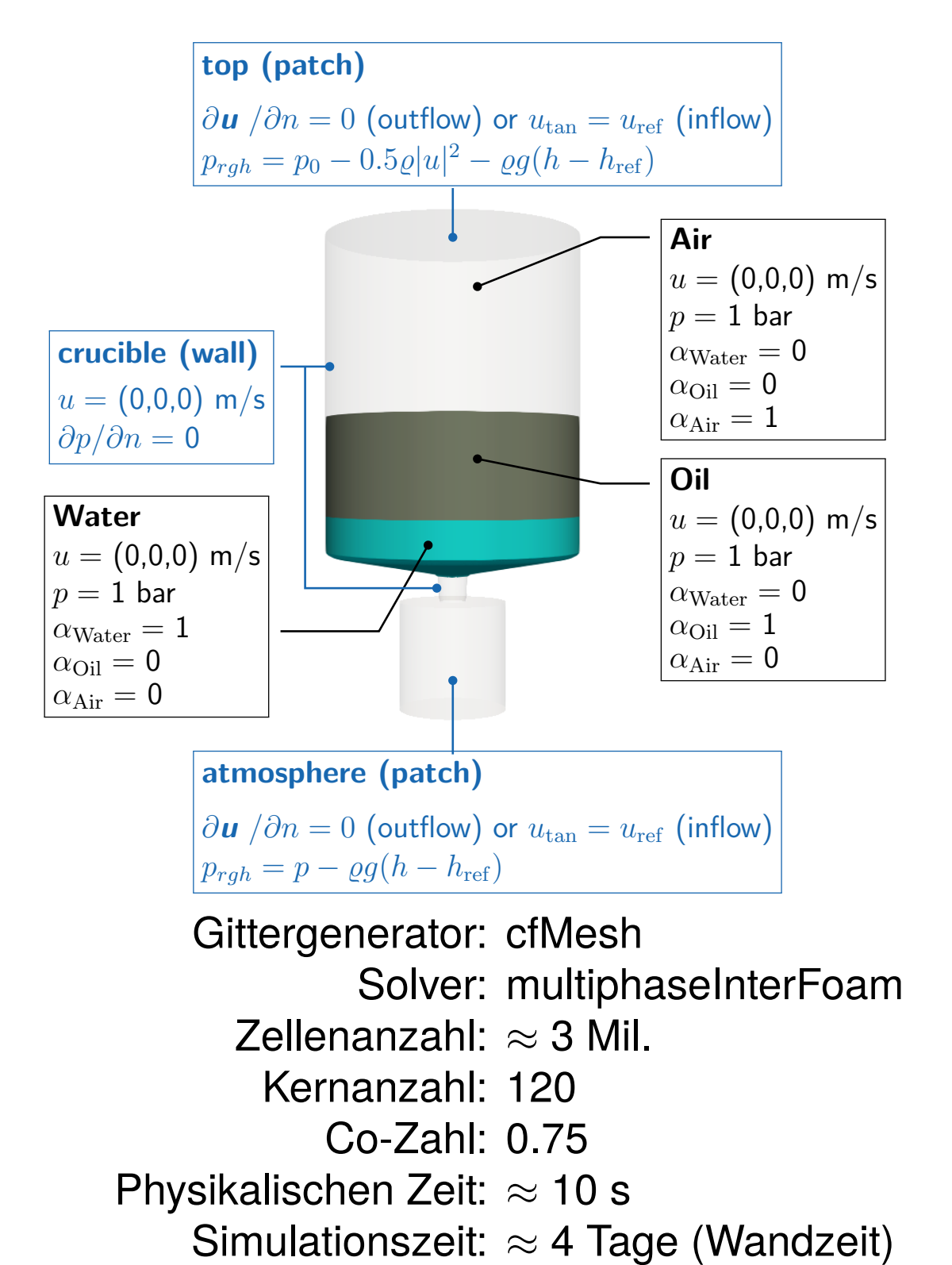
$$\left(\frac{\rho u^2 D}{\sigma} \right)_{WO} \neq \left(\frac{\rho u^2 D}{\sigma} \right)_{SS} \quad (6)$$

4. Experiment & Simulation

Experiment



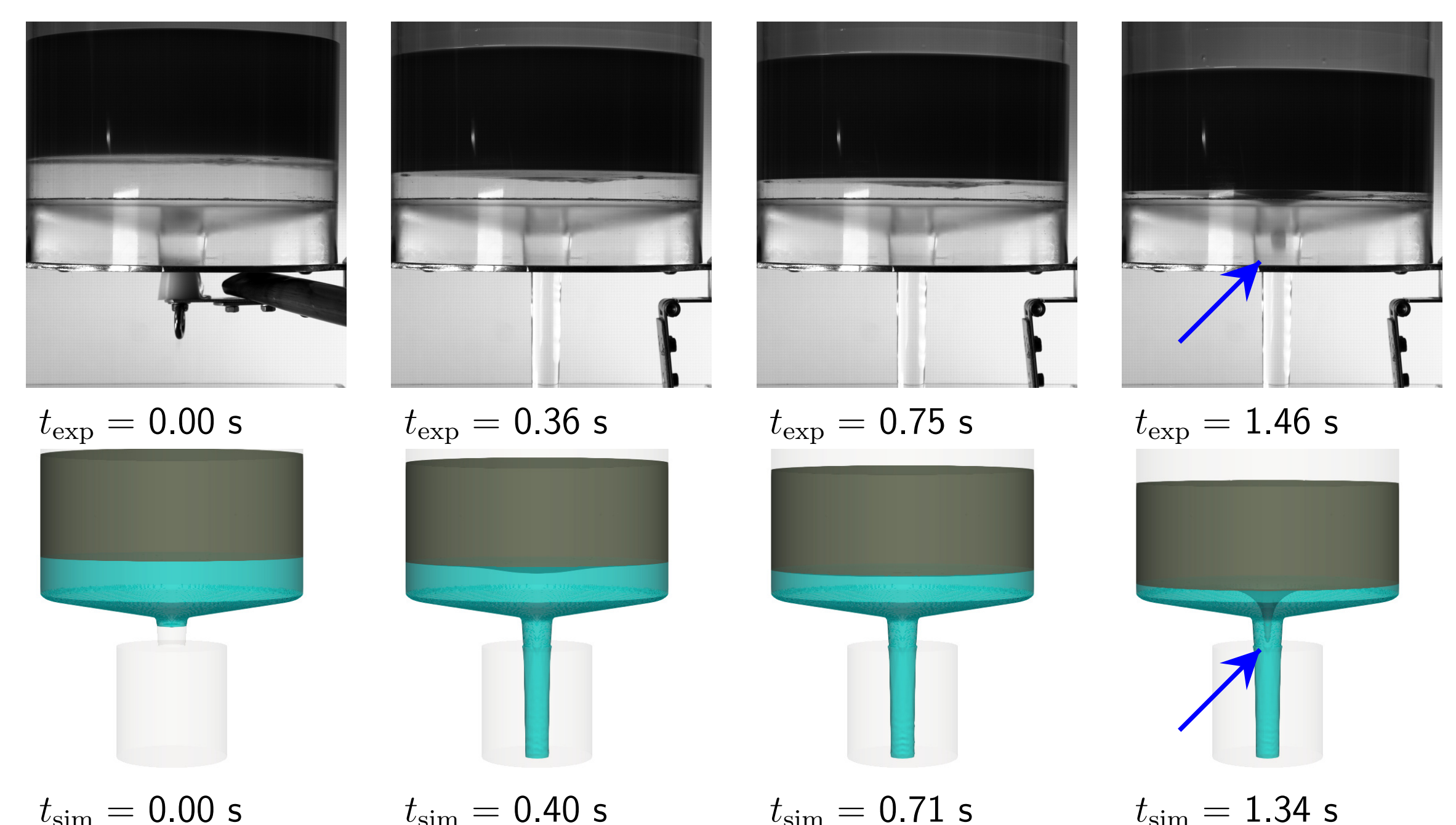
Simulation



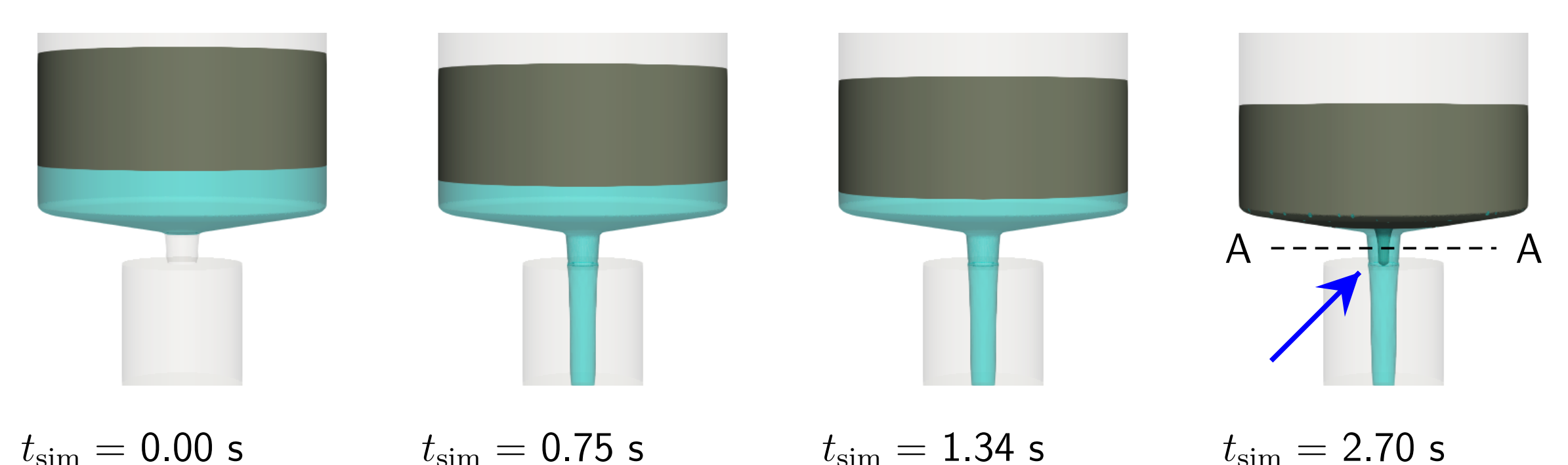
- **Füllung des Reaktionstiegels:** 1 L Wasser und 2 L Öl (Vol.-verhältnis Stahl/Schlacke)
- **Kontrollierte Entleerung im Experiment:** Öffnungsmechanismus
- **Videoaufnahme:** Hochgeschwindigkeitskamera mit 1000 fps

5. Ergebnisse & Diskussion

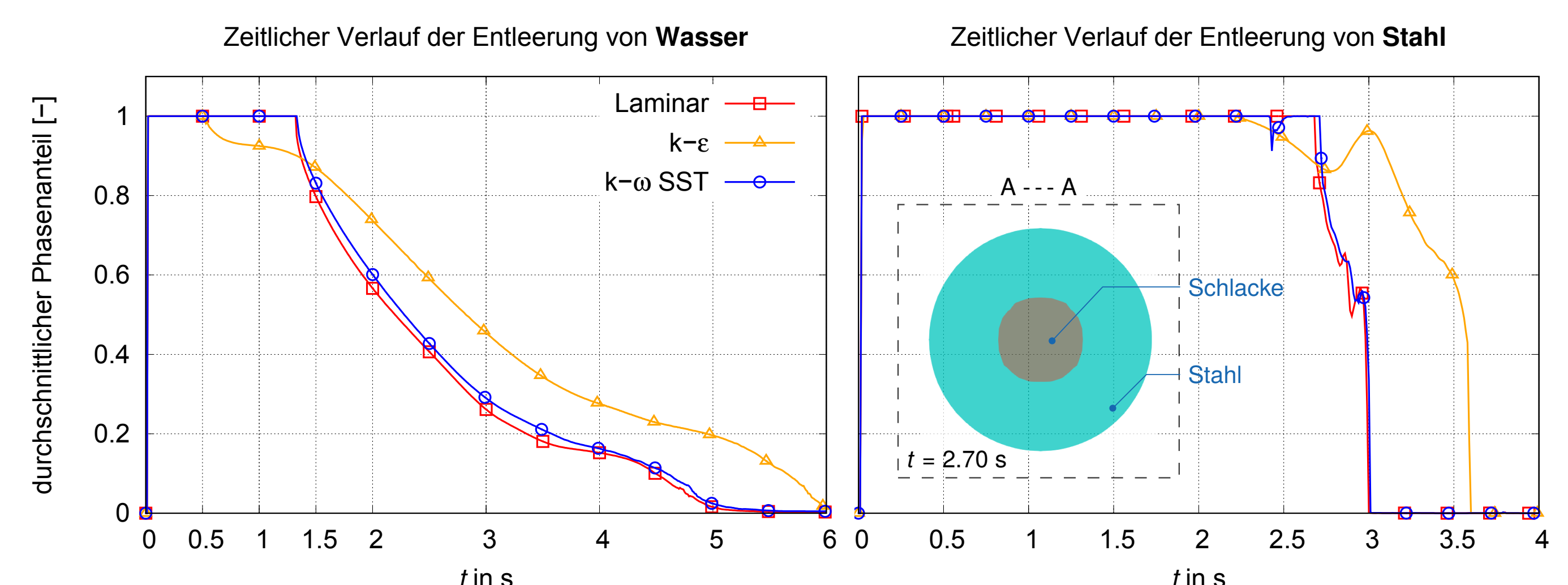
- Vergleich von Experiment und Simulation (laminar) für **Wasser/Öl**



- Simulation (laminar) für **Stahl/Schlacke**



- Notwendigkeit eines **Turbulenzmodells** zur Untersuchung der Formfüllung trotz laminare Ausströmung
- Einfluss **verschiedener** Turbulenzmodelle auf das Ausströmverhalten



- Vollständige Entleerung von **Wasser** innerhalb von **6 s** und **Stahl** innerhalb von **4 s** in allen untersuchten Simulationsvarianten (laminar, turbulent)
- Realitätsnahe Darstellung des laminaren Ausflusses durch das **k-ω-SST-Modell**

