

Preisträger/in: Dipl.-Ing. (FH) Stefan Wenzel, Fakultät Maschinenwesen

Thema: Numerische Simulation von Flüssigmetallströmungen unter Wärmeeintrag mit OpenFOAM

Gutachter/Betreuer: Prof. Dr.-Ing. habil. Volkmar Weise, Fakultät Maschinenwesen

## Transmutation – Alchemie der Moderne

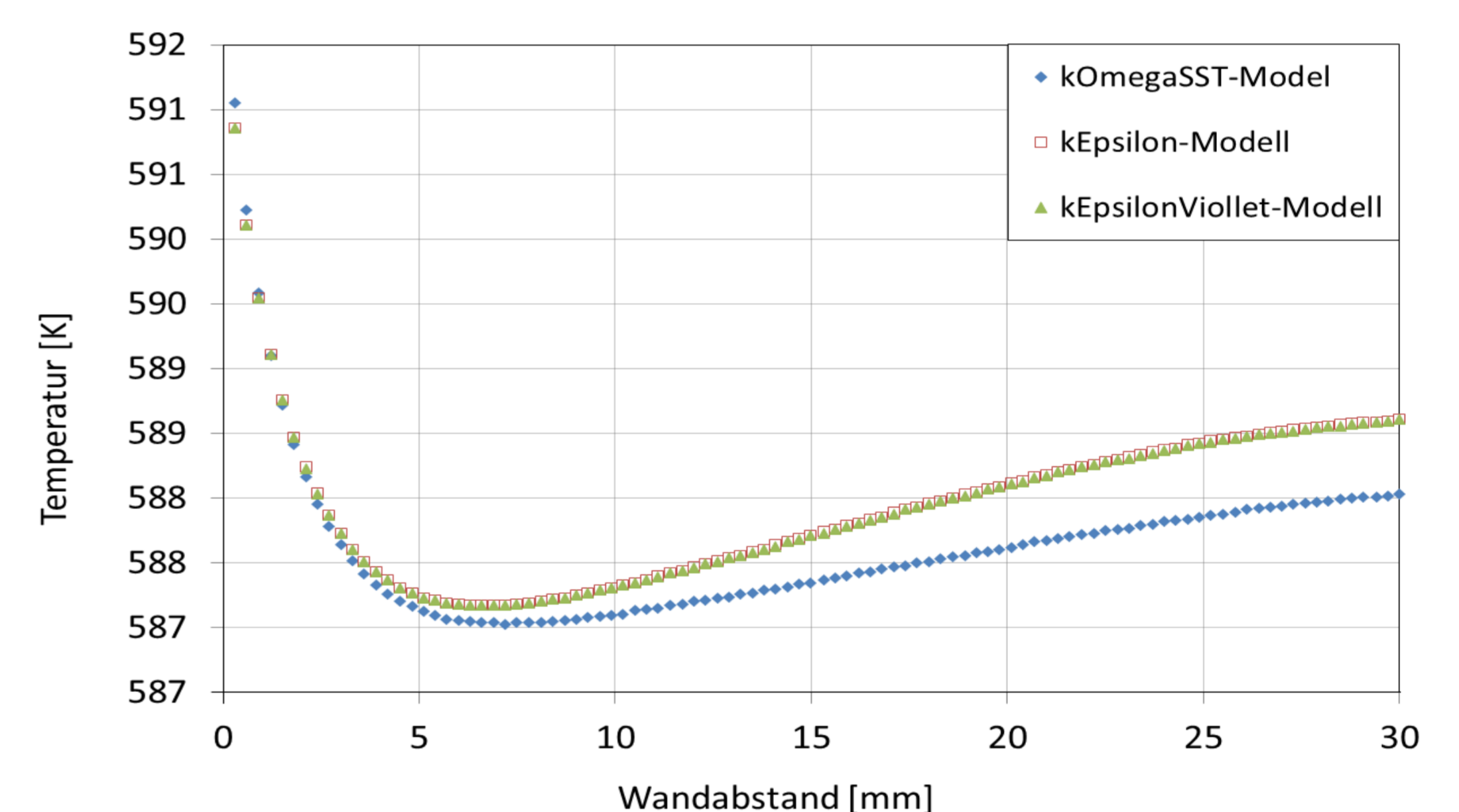
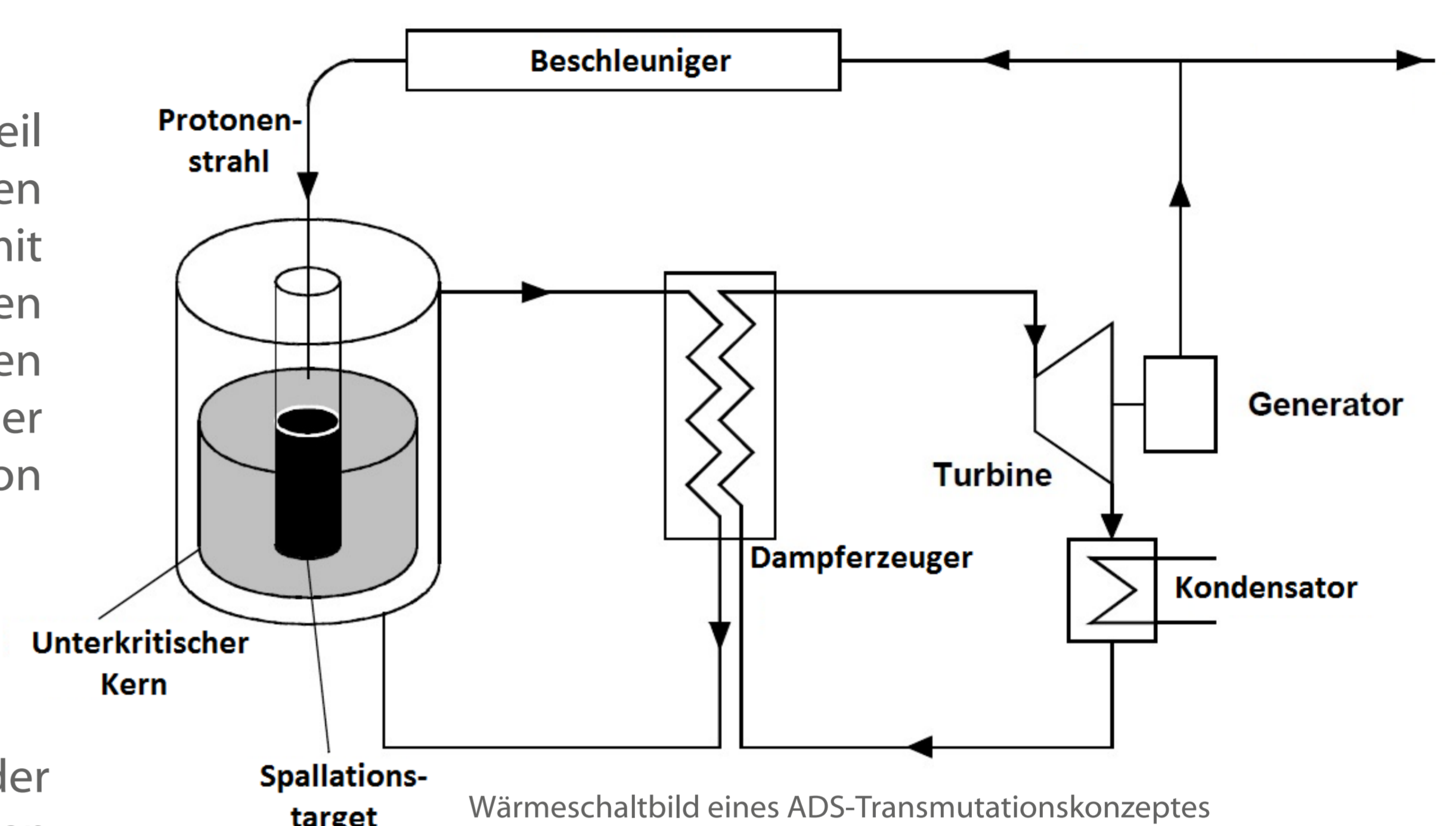
Beim Betrieb von Kernreaktoren fallen weltweit jährlich etwa 12.000 Tonnen abgebrannte Kernbrennstoffe an, für deren endgültige Behandlung noch immer keine allgemein zufriedenstellende Lösung gefunden werden konnte. Da dieser hochradioaktive Abfall erst nach mehreren hunderttausend Jahren wieder das Radiotoxizitätsniveau des natürlichen Ausgangsstoffes im Uranerz erreicht, wird eine Endlagerung dieser Abfälle über derart lange Zeiträume in der öffentlichen Wahrnehmung oft als nicht vertretbares Risiko eingestuft. Bereits seit den Anfängen der kommerziellen Nutzung von Kernreaktoren wird deshalb nach alternativen Behandlungsverfahren für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle gesucht.

Transmutation – also die Umwandlung chemischer Elemente – könnte zukünftig einen Teil der Lösung dieses Problems darstellen. In beschleunigergetriebenen Transmutationsanlagen (eng. Accelerator Driven Systems – ADS) werden schwere Atomkerne, wie Blei, mit hochenergetischen Protonen zertrümmert. Die hierbei in großer Zahl freigesetzten Neutronen wandeln die langlebigen Radionuklide in den abgebrannten Kernbrennstoffen über Kernspaltungen in wesentlich kurzlebigeren Nuklide um. Dadurch könnte die Lagerdauer des radioaktiven Abfalls auf etwa ein Hundertstel reduziert werden. Durch die Spaltreaktion wird außerdem Energie freigesetzt, die zur Stromproduktion genutzt werden kann.

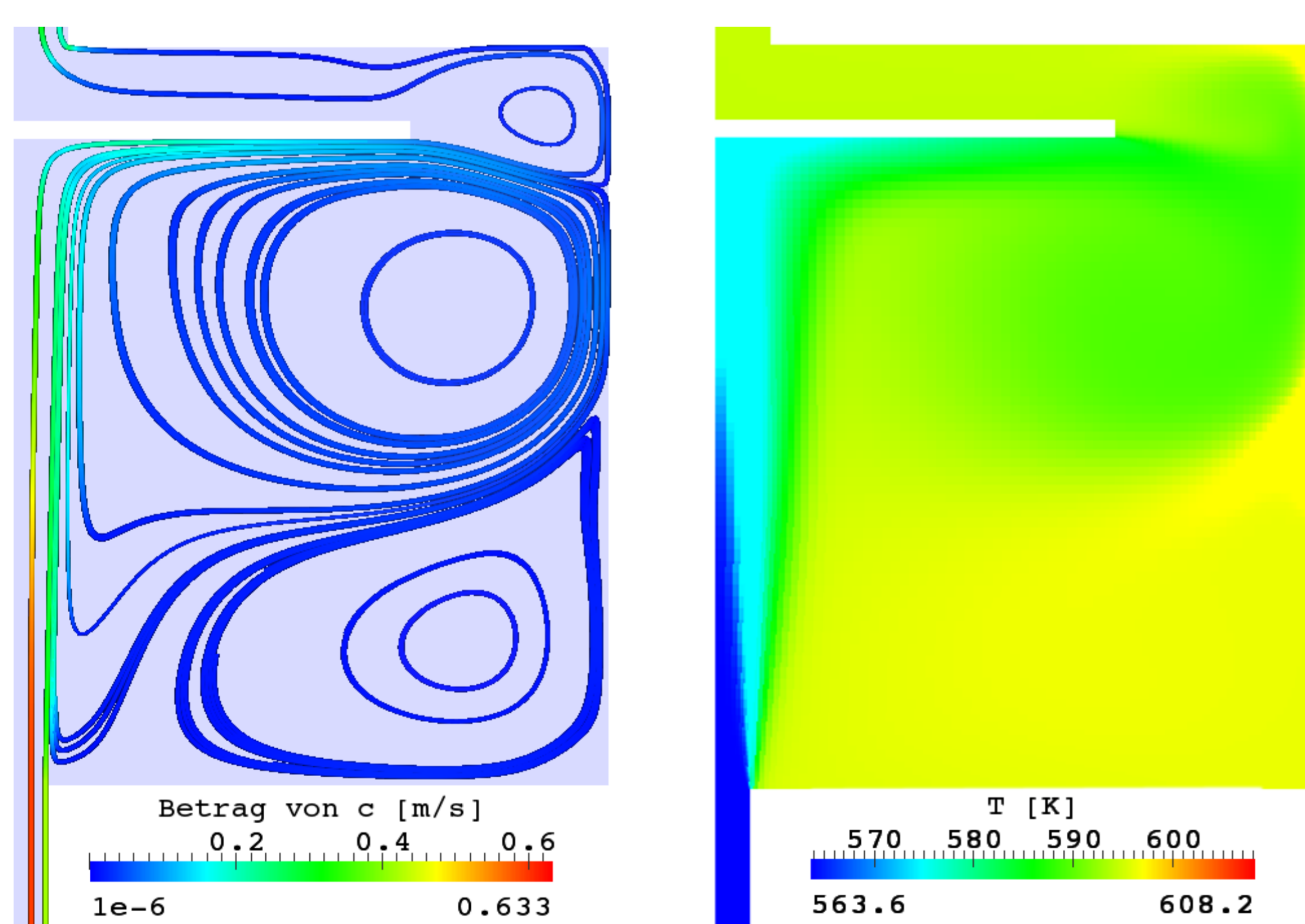
## Flüssigmetall als Neutronenquelle und Wärmeträger

Flüssige Metalle besitzen gegenüber anderen Kühlmedien wie Wasser, sehr hohe Werte der Wärmeleitfähigkeit bei niedrigen spezifischen Wärmekapazitäten. Diese Eigenschaften machen ihre Nutzung als Wärmeträgermedium interessant, wenn hohe Energiedichten an der Wärmequelle auftreten. Als besonders vielversprechend erweist sich dabei eine eutektische Legierung aus Blei und Wismut, die aufgrund ihrer chemischen und neutronenphysikalischen Eigenschaften für die Verwendung in ADS-Anlagen vorgeschlagen wird.

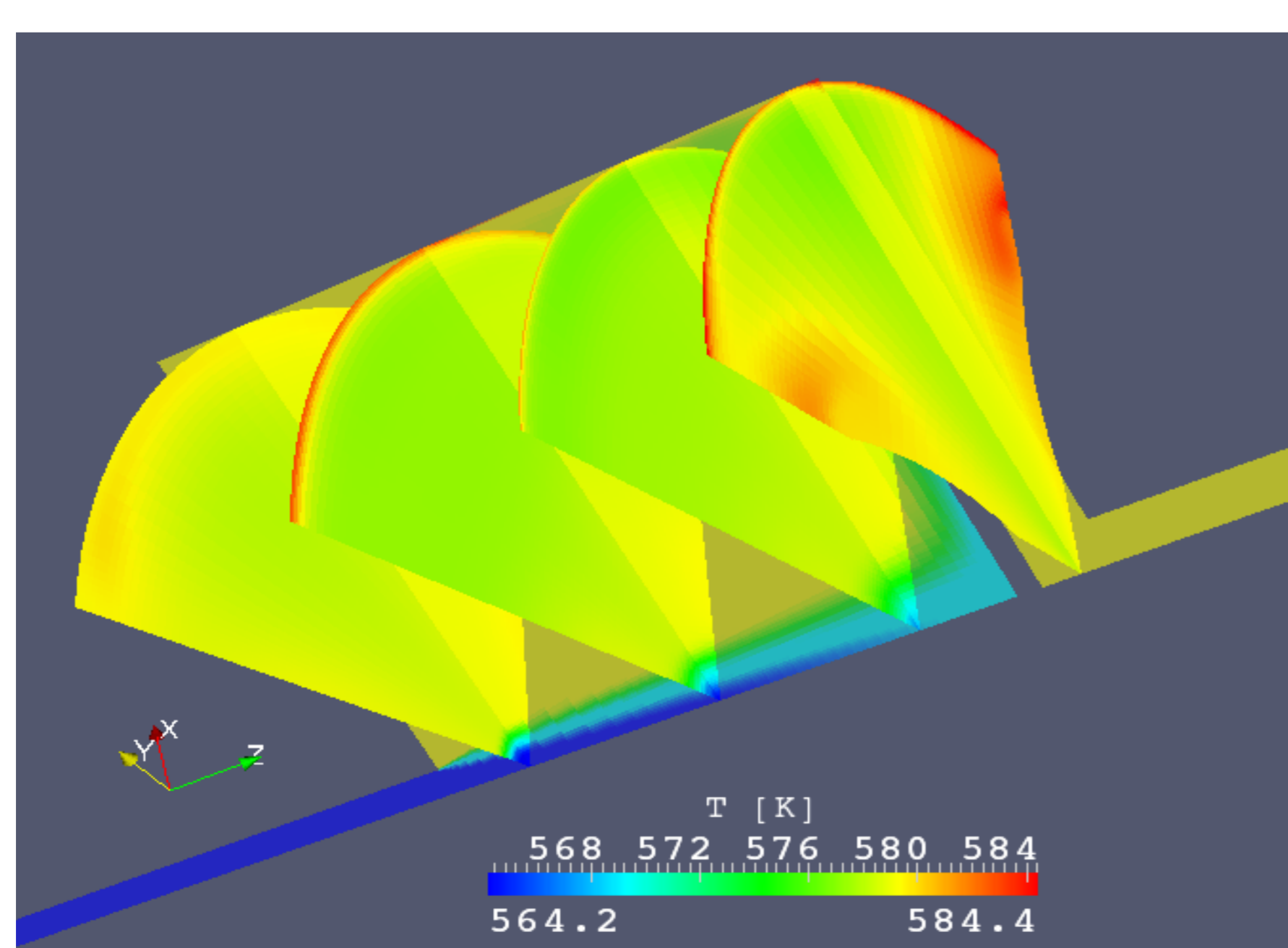
Um thermohydraulische Phänomene im Zusammenhang mit Flüssigmetallströmungen beschreiben und Anlagenverhalten vorhersagen zu können, besteht die Aufgabe solche Strömungen numerisch zu simulieren und die Simulationsergebnisse an Versuchsanlagen zu validieren. Dazu wurde am Royal Institut of Technology (KTH), Stockholm, der "Thermal-hydraulic ADS Lead Bismuth Loop with 3D test section" (TALL-3D) errichtet. Die Simulation von Auslegungstestfällen an der Kerngeometrie dieser Versuchsanlage war Aufgabe der vorgelegten Diplomarbeit.



Gegenüberstellung der Temperaturverläufe mit steigendem Abstand zur beheizten Wand im Inneren der Blei-Wismut-Strömung unter Verwendung verschiedener Turbulenzmodelle



Strömungslinien (links) und Temperaturverteilung (rechts) der Blei-Wismut-Strömung im 2D-Gitter der TALL-Testanlage



Temperaturverteilung der Flüssigmetallströmung im 3D-Gitter

## Numerische Simulation von Flüssigmetallströmungen

Die numerische Simulation zur phänomenologischen Untersuchung von Strömungsproblemen hat sich in den letzten Jahrzehnten verstärkt in der Wissenschaft und im ingenieurtechnischen Bereich etabliert. Hierfür steht auf dem Markt ein breites Spektrum an Strömungssimulationssoftware (Computational Fluid Dynamics: CFD) zur Verfügung. Für die vorliegenden Simulationen wurde das quellcodeoffene, kostenlose und LINUX basierte Softwarepaket OpenFOAM genutzt. Die Verwendung dieses Paketes bietet einige Vorteile. So sind alle implementierten Gleichungen und Modelle jederzeit einsehbar und können frei an die eigenen Bedürfnisse angepasst und verändert werden. Im Zuge der vorliegenden Diplomarbeit wurde beispielsweise ein auftriebsbasiertes Turbulenzmodell in die aktuelle Version der Software eingepflegt und neue Wärmestromrandbedingungen implementiert. Andererseits lässt die Dokumentation und der Support bei Problemen oft Wünsche offen.

Zur Simulation der Flüssigmetallströmung wurde zunächst die Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte vernachlässigt. Die Modellierung erfolgte hier über die Boussinesq-Näherung, die den Auftrieb in Folge des Wärmeeintrages über den Ausdehnungskoeffizienten des Fluides approximiert. Für diese Näherung wurden die Auswirkungen verschiedener Diskretisierungsverfahren und Turbulenzmodellierungen untersucht. Dabei zeigte sich beispielsweise (Grafik oben), dass bei Anwendung des  $k-\omega$ -SST-Modells ein etwas geringerer turbulenter Wärmetransport von der beheizten Wand ins Strömungsinere stattfindet, während der Einfluss eines Auftriebsterms der Turbulenz, wie er bei  $k-\epsilon$ -Viollet modelliert ist, im vorliegenden Fall vernachlässigt werden kann. Im nächsten Schritt wurde die Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte in den Simulationen berücksichtigt. Die Abbildung links oben zeigt Stromlinien und die Temperaturverteilung am 2D-Modell der Kerngeometrie. Um den Einfluss von Einbauten im oberen Bereich der Geometrie auf das dreidimensionale Strömungsbild zu untersuchen, wurde ein 90° Zylinderausschnitt mit Symmetrierandbedingungen vernetzt. In der Abbildung links unten ist die Temperaturverteilung in ausgewählten Ebenen der Geometrie zu erkennen.