

## Aufbau einer Rayleigh-Bénard-Zelle zur Untersuchung von thermischer Konvektion mit Wärmestrahlung

### Construction of a Rayleigh-Bénard cell for studying thermal convection with thermal radiation

**Christian Resagk, Martin Herzberg, Theo Käufer, Clemens Naumann, Christian Karcher, Christian Cierpka**

Institut für Thermo- und Fluidodynamik, Technische Universität Ilmenau, 98684 Ilmenau, Deutschland

Thermische Konvektion, Salzschnmelze, PIV, thermische Energiespeicher

Thermal convection, molten salt, PIV, thermal energy storage

### Zusammenfassung

Im Beitrag werden Aufbau und erste Messungen des Geschwindigkeitsfeldes in einer kubischen Rayleigh-Bénard-Zelle zur Untersuchung von thermischer Konvektion in einer heißen Salzschnmelze bei 170 bis 250 °C vorgestellt. Infolge der hohen Temperaturen und der Semitransparenz des Arbeitsfluides leistet die Wärmestrahlung neben der Konvektion hier einen signifikanten Beitrag zum Wärmetransport und führt zu Beeinflussung des Temperaturfeldes und der Konvektionsströmung. Für die verschiedenen Rayleigh-Zahlen ergeben sich unterschiedliche großskalige Strömungsstrukturen (LSC), welche auch über längere Zeiträume untersucht werden konnten. Der Aufbau der Zelle zeigte selbst bei mehrstündigem Betrieb bei 250 °C keine Leckage und ermöglicht damit zukünftige Langzeitstudien zur Reorganisation der LSC. Die eingesetzten SiO<sub>2</sub>-Tracer-Partikel zeigten ein sehr gutes Folgevermögen und eine gute Dichteanpassung. Das hohe Signal-Rausch-Verhältnis ermöglicht eine sehr hohe räumliche Auflösung. Während der Messungen kam es zu Kristallisation an den Tracer-Partikeln bei niedrigen Temperaturen. Das geschmolzene Salz erstarrt bei Temperaturen unter 150 °C. Die Zelle ist so konzipiert, dass diese zerlegt werden und das Salz entnommen werden kann. Das Salz wird anschließend gemahlen und im nächsten Experiment wiederverwendet, wobei die Tracer-Partikel erhalten bleiben. Die experimentellen Arbeiten dienen zur Grundlagenforschung für den Einsatz von Salzschnmelzen als Arbeitsmedium in thermischen Energiespeichern.

### Einleitung

Salzschnmelzen besitzen ein großes Potenzial als Arbeitsmedium in zukünftigen großskaligen thermischen Energiespeichersystemen wie zum Beispiel in Carnot-Batterien (Otto et al. 2023). Als kanonisches Modellsystem für thermisch getriebene Strömungen gilt die Rayleigh-Bénard-Konvektion zwischen einer beheizten Bodenplatte und einer gekühlten Deckelplatte. Die Raleigh-Zahl ( $Ra = \frac{\beta g}{\nu \kappa} \Delta T H^3$ ) gibt dabei das Verhältnis von Auftrieb zu viskoser und thermischer Diffusion an. Hierin steht  $\beta$  für den Volumenausdehnungskoeffizienten,  $g$  für die Erdbeschleunigung,  $\nu$  für die kinematische Viskosität,  $\kappa$  für die Temperaturleitfähigkeit,  $\Delta T$  für die angelegte Temperaturdifferenz und  $H$  für die Höhe des Systems. Die typischen Temperaturen der semitransparenten Salze liegen dabei im Bereich von 200 – 400 °C. In diesem Bereich kann sich das Strömungsverhalten bei thermisch getriebener Konvektion deutlich von dem bei

niedrigen Temperaturen unterscheiden, da zusätzlich Strahlungseffekte eine große Rolle spielen. Als zusätzliche Parameter treten in solchen Systemen die Prandtl-Zahl ( $Pr = \frac{\nu}{\kappa}$ ) und die Planck-Zahl  $Pl = \left(\frac{\lambda}{H}\right) / (4\sigma_{SB}T_0^3)$  auf, welche das Verhältnis von kinematischer Viskosität und Temperaturleitfähigkeit sowie das Verhältnis von Wärmeleitung zum Wärmeübergang durch Strahlung beschreiben,  $\sigma_{SB}$  steht für die Stefan-Boltzmann Konstante,  $\lambda$  für die Wärmeleitfähigkeit und  $T_0$  für die mittlere Referenztemperatur. Im Falle kleiner Planck-Zahlen dominiert der Einfluss der thermischen Strahlung gegenüber dem Einfluss der Wärmeleitung, was insbesondere bei hohen Temperaturen relevant ist. Darüber hinaus haben Salzschnmelzen eine elektrische Leitfähigkeit die eine magneto-hydrodynamische Strömungsbeeinflussung ermöglicht. Aus diesem Grund soll ein Experiment aufgebaut werden, welches grundlegende Strömungsuntersuchungen der Rayleigh-Bénard-Konvektion (RBC) bei zusätzlichem Einfluss der Wärmestrahlung (Soucasse et al. 2020) und eines Magnetfeldes (Song et al. 2023; Li et al. 2024a) erlaubt. In einer ersten Voruntersuchung zeigte sich, dass die Particle Image Velocimetry (PIV) prinzipiell gut geeignet ist, um Geschwindigkeitsfelder in Salzschnmelzen zu messen.

### Experimentelles Setup

Erste Experimente zu RBC in geschmolzenen Salzen wurden bereits 1979 von Hopfinger et al. (und Referenzen darin) diskutiert. Bisher gibt es allerdings nur wenige Studien zur Anwendung optischer Messtechniken in Salzschnmelzen. Sadoway und Szekely (1980) verwendeten die Laser-Doppler-Velocimetry in elektromagnetisch angetriebenen Salzschnmelzen zur Strömungscharakterisierung und Cramer et al. (2011) nutzen PIV, um die Marangoni-Strömung auf einer freien Salzschnmelzenoberfläche zu untersuchen. Prinzipiell erfordert die Anwendung optischer Messtechniken in heißen Salzschnmelzen eine optisch hinreichende transparente Konvektionszelle, welche gleichzeitig den hohen Temperaturen und der Salzschnmelze standhält. Für die aktuellen Untersuchungen wurde daher eine modulare Zelle (Abb. 1) entworfen. Diese besteht aus Quarzglas und wird nach oben und unten durch Heizplatten begrenzt. Die Heizplatten bestehen aus einer Aluminiumlegierung, die aufgrund ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit ausgewählt wurde. Dies ist insofern wichtig, da geringfügige Änderungen der Randbedingungen (konstante Temperatur oder konstanter Wärmestrom) die Strömung erheblich verändern können (Käufer et al. 2023).

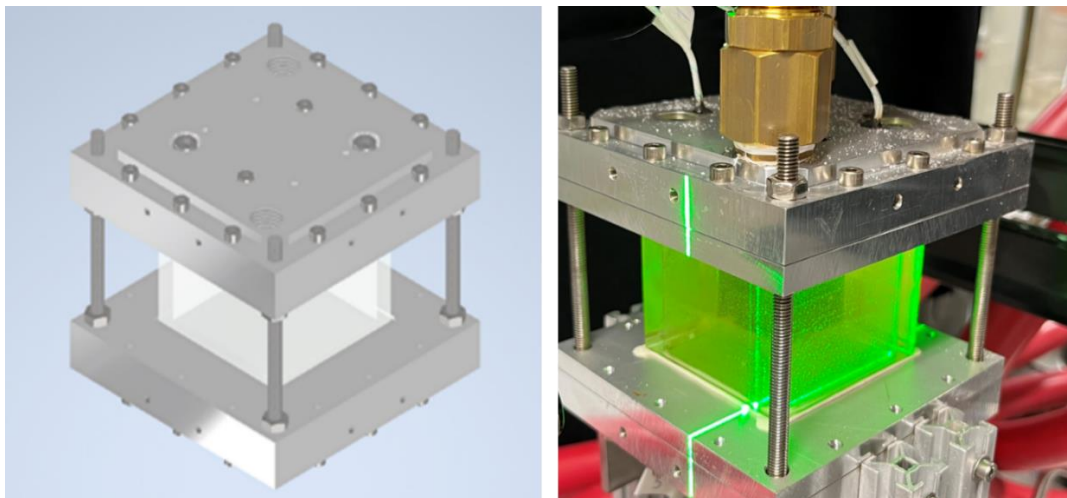


Abb. 1: CAD Modell (links) und Fotografie (rechts) der gefüllten Quarzglaszelle mit Heizplatten aus Aluminium, Temperatursensoren und Laser-Lichtschnitt.

Die Zelle hat eine quadratische Grundfläche von 60 mm bei einem Aspektverhältnis (Seitenlänge zu Höhe) von eins. Die Temperatur der Heizplatten werden mit zwei getrennten Hochtemperaturthermostaten kontrolliert und können von 15°C bis 400°C eingestellt werden, wobei die derzeit verwendeten Silikondichtungen bis 250 °C langzeitstabil sind. Für die Messung der von den Heizplatten integral an das System übertragenen Leistung sind jeweils 4 Thermoelemente verbaut und werden während der Experimente kontinuierlich mit einem AGILENT-Datenlogger ausgelesen.

Als Fluid dient die Salzschnmelze HITEC (53 %  $\text{KNO}_3$ , 40 %  $\text{NaO}_2$ , 7 %  $\text{NaNO}_3$ ), welche optisch semitransparent ist. Als Tracer-Partikel wurden  $\text{SiO}_2$ -Partikel mit einem Durchmesser von 10  $\mu\text{m}$  und eine Dichte von 2  $\text{gcm}^{-3}$  (wie Salzschnmelze) eingesetzt. Im Gegensatz zur den vorher genutzten silberbeschichteten Glashohlkugeln zeigten diese ein sehr gutes Folgevermögen bei nahezu neutralem Auftriebsverhalten.

Zur Beobachtung der Strömung wurde mittels eines cw-Linienlaser (Z-LASER) mit 532 nm Wellenlänge und 40 mW Leistung ein Lichtschnitt erzeugt und seitlich in das System eingekoppelt, wobei die Tiefe in der Zelle verfahren werden kann (siehe Abb. 2). Eine M-LITE 2M SCMOS-Kamera (LaVision GmbH) mit einem NIKON Nikko-Objektiv (35 mm, 1:1,14) wurde zur Aufnahme der Partikelbilder genutzt. Die Bildrate (Einzelbildauswertung) und Belichtungszeit wurden zu 40 Hz bzw. 7 ms eingestellt. Aufgrund der Reflexionen an den Heizplatten der RBC-Zelle wurde für die PIV-Auswertung ein kleineres Fenster (60 mm x 52 mm) verwendet.

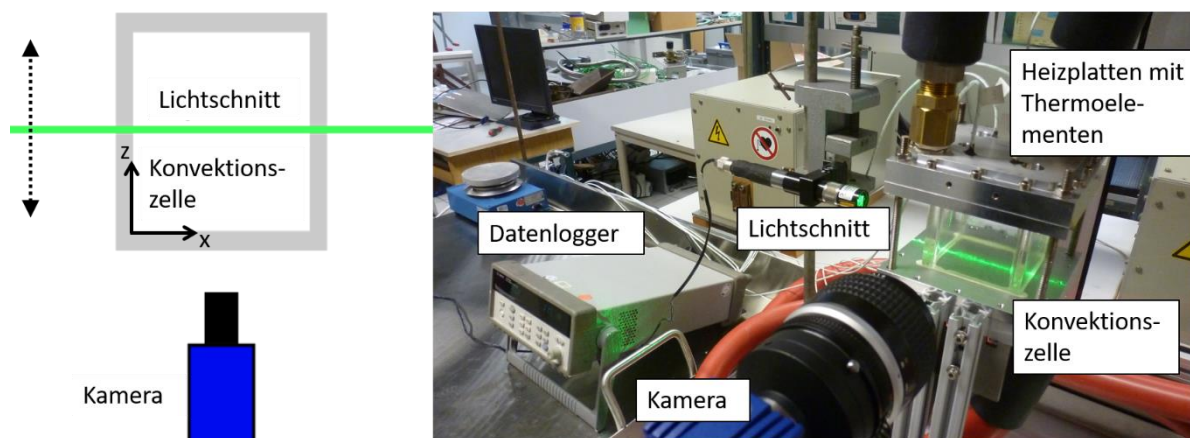


Abb. 2: Schematische Messanordnung (links) und Fotografie (rechts) des PIV-Setups an der RBC-Zelle.

## Ergebnisse

In Abb. 3 sind die mittlere Geschwindigkeit sowie die Standardabweichung für zwei Messebenen bei  $z = 15 \text{ mm}$  und  $z = 55 \text{ mm}$  dargestellt. Die finalen Auswertefenster betragen  $24 \times 24$  Pixel mit 50% Überlappung, was zu einem Vektorabstand von 0,52 mm führt. In der Abbildung wird jeder 6. Vektor angezeigt und die Hintergrundfarbe entspricht der Geschwindigkeitsgröße. Die Temperatur der Kühlplatte wurde auf 160 °C und die Temperatur der Heizplatte auf 250 °C eingestellt. Damit ergibt sich eine Rayleigh-Zahl von  $\text{Ra} = 10^8$ . Zur zeitlichen Mittelung wurden pro Durchlauf 500 Bilder aufgenommen. Für diese hohe Rayleigh-Zahl ist eine einzelnen Konvektionsrolle deutlich erkennbar. Diese ist in diagonaler Richtung ausgerichtet, was eine typische Konfiguration in einer Konvektionszelle mit Seitenverhältnis eins ist. Aufgrund der angelegten hohen Temperaturdifferenz von 90 K werden Geschwindigkeiten bis 15 mm/s bei einer Standardabweichung von bis zu 6 mm/s erreicht. Aufgrund einer erhöhten Oberflächenrauigkeit und dadurch bedingten Ablagerungen von Partikeln konnte lediglich eine Messzeit von ca. 1 h erreicht werden. Mittlerweile wurde eine neue Messzelle mit deutlich besserer

optischer Qualität gefertigt, welche Langzeitmessungen ermöglichen. Bei geringen Temperaturen in der Nähe der Erstarrungstemperatur (Heizplatten: ca. 150-160°C) kam es aufgrund der nicht-isolierten Zellwände zur Kristallisation des Salzes an der Wand, was ebenfalls die Messzeit begrenzte. Bei hohen Temperaturen trat dieser Effekt nicht mehr auf.

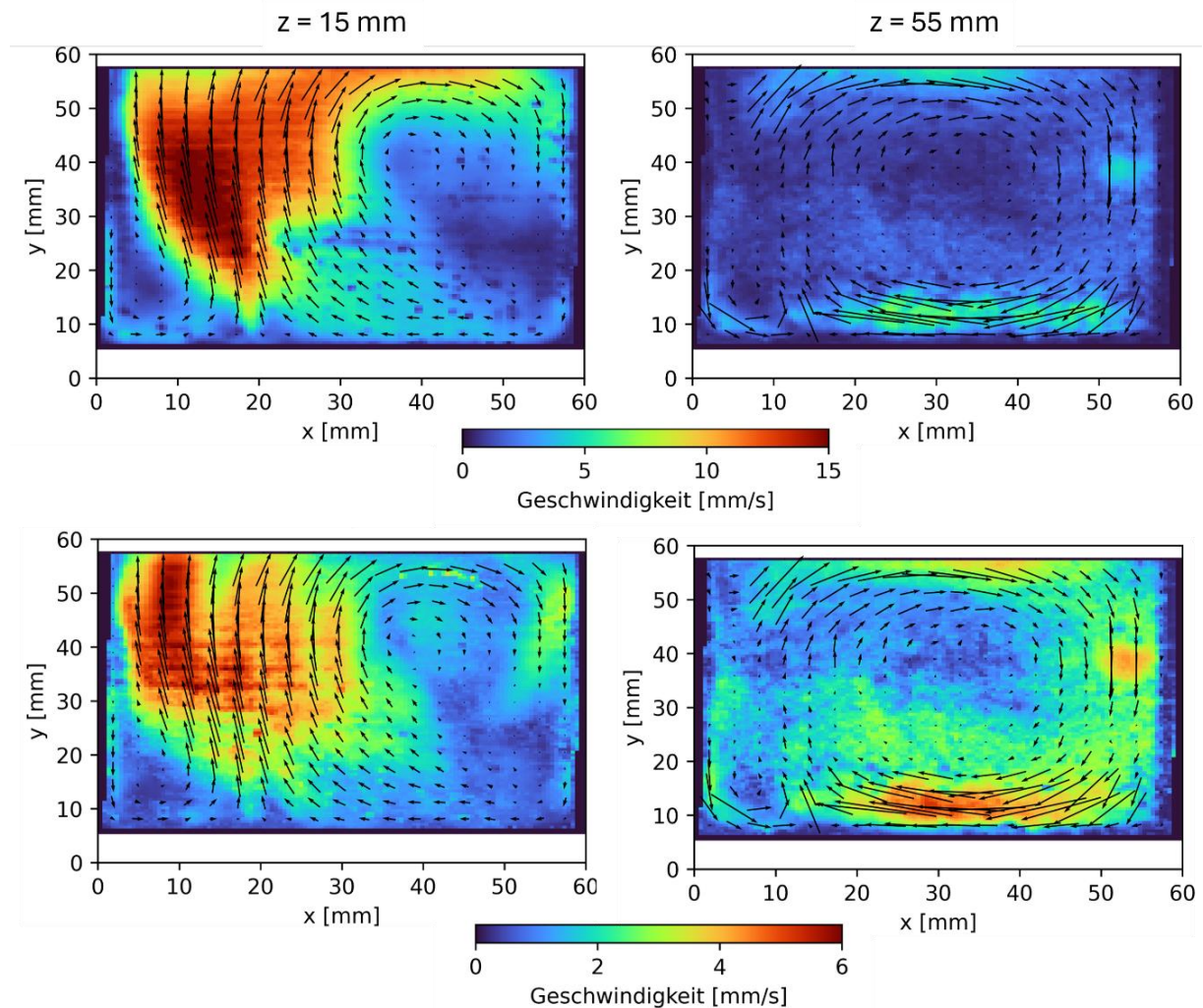


Abb. 3: Vektordarstellung der gemittelten Geschwindigkeit (oben) und Standardabweichung (unten) bei  $z = 15$  mm (links) und  $z = 55$  mm (rechts) für  $Ra = 10^8$ .

## Diskussion

Insgesamt kann festgestellt werden, dass PIV-Messungen in der mit Salzschnmelze gefüllten Konvektionszelle im aktuellen Aufbau mit hohem Signal-zu-Rauschverhältnis möglich sind. Während der Fachtagung werden Messungen für verschiedene Rayleigh-Zahlen gezeigt und die beobachteten LSC im Detail besprochen. Das hohe Signal-zu-Rauschverhältnis ermöglicht räumlich sehr hochaufgelöste Momentanmessungen. Deutlich höhere Auflösungen für die Mittelwerte sind zusätzlich über Korrelationsmittelungen möglich. Mit den zeitaufgelösten Daten kann auch die Neuorientierung der LSCs über längere Zeiträume untersucht werden. Im Laufe der Zeit waren an den Quarzglasfenstern allerdings gewisse Verschlechterungen der Transparenz zu sehen, die weiter analysiert werden müssen. Der Aufbau der Zelle zeigte selbst bei mehrstündigem Betrieb bei 250°C keine Undichtigkeiten und ermöglicht zukünftige Langzeitstudien. Bei geringen Temperaturen ( $< 160^\circ\text{C}$ ) kam es aber an den  $\text{SiO}_2$  Partikeln zur Kristallisation des Salzes. Wenn das geschmolzene Salz bei Raumtemperatur vollständig erstarrt ist,

kann die Zelle zerlegt und das Salz entnommen, gemahlen und im nächsten Experiment wiederverwendet werden. In Zukunft sollen die Randbedingungen weiter verbessert werden, da Strahlung an die Umgebung und Wärmeleitung über die Experimentalaufbauten minimiert werden müssen, um die Strömung nicht zu beeinflussen. Anschließend sollen für die gleichen Parameter numerische Simulationen durchgeführt werden (Krasnow et al. 2011), um die Wirkungen von Wärmestrahlung und Magnetfeld zu untersuchen.

## Dankesworte

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung im Rahmen der Sachbeihilfen Nr. 467227170 und 537846345. Weiterhin danken wir Wladislaw Seifferth und Alexander Thieme für die technische Unterstützung der Messungen.

## Literatur

Cramer, A., Landgraf, S., Beyer, E., Gerbeth, G., (2011) Marangoni convection in molten salts, *Experiments in Fluids*, 50, 479–490, DOI: 10.1007/s00348-010-0951-8

Hopfinger, E.J., Atten, P., Busse, F.H. (1979) Instability and convection in fluid layers: A report on Euromech 106. *Journal of Fluid Mechanics*, 92, 217–240, DOI: 10.1017/S0022112079000604

Käufer, T., Vieweg, P.P., Schumacher, J., Cierpka, C. (2023) Thermal boundary condition studies in large aspect ratio Rayleigh-Bénard convection, *European Journal of Mechanics B-Fluids*, 101, 283-293, DOI: 10.1016/j.euromechflu.2023.06.003

Krasnov, D., Zikanov, O., Boeck, T. (2011) Comparative study of finite difference approaches in simulation of magnetohydrodynamic turbulence at low magnetic Reynolds number, *Computers & Fluids*, 50, 46-59, DOI: 10.1016/j.compfluid.2011.06.015

Li, P. X., Luo, X. H., Chen, L., Song, J. J., Li, B. W., Karcher, C. (2024a) Numerical research for the effect of magnetic field on convective transport process of molten salt in Rayleigh-Bénard system, *International Journal of Thermal Science*, 195, 108605, DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2023.108605

Li, P., Calmbach, J., Naumann, C., Resagk, C., Cierpka, C., Karcher, C. (2024b) Experimentelle Untersuchung und numerische Analyse konvektiver Wärme- und Stofftransportprozesse in Salzschnmelzen unter Wirkung von Magnetfeldern und Wärmestrahlung, *Technisches Messen*, DOI: 10.1515/teme-2024-0018

Otto, H., Naumann, C., Odenthal, C., Cierpka, C. (2023) On the unsteady inherent convective mixing in thermal energy storage systems during stand-by periods, *Physical Review X - Energy*, 2, 043001, DOI: 10.1103/PRXEnergy.2.043001, featured in *Physics*, open access

Sadoway, D.R., Szekely, J., (1980) A new experimental technique for the study of turbulent electromagnetically driven flows, *Metallurgical Transactions B* 11, 334–336, DOI: 10.1007/BF02668421

Song, J.J., Li, P.X., Chen, L., Li, C.H., Li, B.W., Huang, L.Y. (2023) A review on Rayleigh-Bénard convection influenced by the complicating factors, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 144, 106784, DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.106784

Soucasse, L., Podvin, B., Rivière, P., Soufiani, A. (2020) Reduced-order modelling of radiative transfer effects on Rayleigh-Bénard convection in a cubic cell, *Journal of Fluid Mechanics*, 898, A2-1, DOI: 10.1017/jfm.2020.395