

## Vergleich optischer Messtechniken zur Charakterisierung von thermischen Konvektionszuständen in Salzschnmelzen im Hochtemperaturbereich

### Comparison of optical measurement techniques for characterizing thermal convection modes in molten salt at high temperatures

**J. Calmbach, C. Naumann, C. Resagk, C. Karcher, C. Cierpka**  
Institut für Thermo- und Fluidodynamik, Technische Universität Ilmenau

Schlagwörter: PIV, LDA, thermische Konvektion, Salzschnmelzen  
Keywords: PIV, LDV, thermal convection, molten salt

#### Zusammenfassung

Salzschnmelzen rücken als Arbeitsmedium für thermische Energiespeicher in den Vordergrund, welche für die Energiewende einen wichtigen Baustein bilden. Strömungsvorgänge in diesem Medium sind bisher wenig untersucht. Die hohen Arbeitstemperaturen und die korrosiven Eigenschaften der Salzschnmelzen stellen eine experimentelle Herausforderung dar. Der Wärmetransport im Fluid wird aufgrund der optischen Eigenschaften bei hohen Arbeitstemperaturen neben Wärmeleitung und thermischer Konvektion zusätzlich durch thermische Strahlungseffekte beeinflusst. In vorliegendem Projekt wird eine kubische Zelle mit einem Aspektverhältnis von  $\Gamma = 1$  zur Untersuchung des Einflusses der Strahlungseffekte in Rayleigh-Bénard-Konvektion (RBK) verwendet. Das Arbeitsmedium ist ein Nitrat/Nitrit-Salzgemisch (HITEC) mit einer Prandtl-Zahl von  $Pr = 20$  (bei  $T_m = 200^\circ\text{C}$ ). Das erste Ziel besteht darin, das Strömungsfeld der Salzschnmelze mittels nicht-invasiver Methoden zu bestimmen. Hierfür kommen aufgrund der Transparenz des Mediums die optischen Strömungsmesstechniken Particle-Image-Velocimetry (PIV) und Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) in Betracht, welche sich im Wesentlichen durch das zeitliche und räumliche Auflösungsvermögen unterscheiden. Zur Messung der Strömung werden der Salzschnmelze Hohlglaskugeln mit 2 bis 20  $\mu\text{m}$  Durchmesser und einer Dichte von  $\rho_p = 1,1 \text{ g/cm}^3$  als Partikel zugesetzt. Trotz der hohen Dichteunterschiede zwischen Partikel und Salzschnmelze deutet die Stokes-Zahl mit  $Stk = 4 \cdot 10^{-7}$  auf ein gutes Folgevermögen der Partikel hin. Die Ergebnisse der in dieser Arbeit durchgeführten Testmessungen bestätigen die Anwendbarkeit von LDA und PIV zur Strömungscharakterisierung und ermöglichen die Aufnahme von Geschwindigkeitsprofilen bzw. 2D-Geschwindigkeitsfeldern in Salzschnmelzen. In diesem Beitrag wird das Projektvorhaben skizziert und ein Vergleich der zwei optischen Messmethoden zur Bestimmung der Strömungsstruktur in Salzschnmelzen gegeben.

#### Einleitung und Projektbeschreibung

Als Speichermedium für thermische Energiespeicher wird Salzschnmelzen durch vorteilhafte thermische Eigenschaften derzeit ein hohes Potential zugeschrieben (Bauer et al. 2021). Für die Energiewende hin zu mehr volatilen erneuerbaren Energien bilden diese Energiespeicher einen wichtigen Baustein (Alva et al. 2018). Auch für weitere energietechnische Anwendungen wie konzentrierte Solarkraftwerke und als Kühlmittel für Kernreaktoren der 4. Generation kommt das Medium bereits zum Einsatz (Chavez et al. 2021). Im Vergleich zu konventionell vorwiegend eingesetzten Arbeitsmedien wie Wasser und Ölen weisen Salzschnmelzen einen deutlich geringeren Dampfdruck auf, dies erlaubt eine einfachere Bauweise ohne Druckventile.

Strömungsvorgänge in diesem Medium sind bisher wenig untersucht. Dabei haben thermisch induzierte Strömungen in sensiblen Wärmespeichern einen großen Einfluss auf den Speicherwirkungsgrad (Otto et al. 2021). Ebenso ist es aus sicherheitstechnischen Aspekten für diese Anlagen wichtig, Strömungsvorgänge innerhalb des Mediums zu kennen. Durch die hohen Arbeitstemperaturen und die korrosiven Eigenschaften der Salzschnmelzen stellt dies eine experimentelle Herausforderung dar. Zusätzlich sind Nitratschnmelzen im sichtbaren Spektrum semi-transparent und in ihrem Emissionsspektrum optisch dick (Drotning 1977, Tetreault-Friend et al. 2017). Der Wärmetransport im Fluid wird daher bei hohen Arbeitstemperaturen neben thermischer Konvektion und Wärmeleitung auch durch thermische Strahlungseffekte beeinflusst. In einem Modellversuch zur Untersuchung der sogenannten Rayleigh-Bénard-Konvektion (RBK) verändert dies den Stofftransport im Vergleich zu RBK bei niedrigen Arbeitstemperaturen (Song et al. 2023).

Bei der RBK handelt es sich um ein klassisches Modell der natürlichen thermischen Konvektion, wobei die Temperaturdifferenz  $\Delta T = T_H - T_C$  zwischen der unteren ( $T_H$ ) und oberen isothermen Randbedingung ( $T_C$ ) den Antriebsfaktor bildet. Ab einer kritischen Temperaturdifferenz wechselt der Wärmetransport von reiner Wärmeleitung durch thermischen Auftrieb zu einem stationären Zustand der thermischen Konvektion (Lord Rayleigh 1916). Es entstehen selbstorganisierte Strukturen wie Konvektionsrollen und Zellenmuster, bis hin zu oszillierenden Instabilitäten und dem Übergang zur Turbulenz (Bodenschatz et al. 2000, Ahlers et al. 2009). In dimensionsloser Form charakterisieren die vier nachfolgenden Kennzahlen die RBK:

$$Pr = \frac{\nu}{\kappa}, \quad Ra = \frac{\beta g \Delta T H^3}{\nu \kappa}, \quad \Gamma = \frac{W}{H}, \quad Nu = \frac{\alpha H}{\lambda}.$$

Die Prandtl-Zahl  $Pr$  definiert das Verhältnis von diffusivem Impulstransport (kinematischen Viskosität  $\nu$ ) zum diffusivem Wärmetransport (Temperaturleitfähigkeit  $\kappa$ ). Die Rayleigh-Zahl  $Ra$  beschreibt dabei das Zeitskalenverhältnis der thermischen Diffusionszeit zur konvektiven Transportzeit. Hierfür sind der thermische Expansionskoeffizient  $\beta$ , die Gravitationskonstante  $g$  und die Höhe  $H$  notwendig. Die Geometrieverhältnisse werden unter zusätzlicher Angabe der Breite  $W$  der Zelle mit dem Aspektverhältnis  $\Gamma$  beschreiben. Zuletzt stellt die Nusselt-Zahl  $Nu$  die dimensionslose Wärmeübergangszahl dar und charakterisiert das Verhältnis des Gesamtwärmestroms zum rein diffusiven Wärmetransport. Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  ist dabei ein Stoffparameter und der konvektive Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  wird beeinflusst durch Umgebungsfaktoren. Die definierten Randbedingungen und auslegbaren Parameter machen die RBK zu einem idealisierten Modell zur Untersuchung des gekoppelten Stoff- und Wärmetransports. Bisherige Untersuchungen der RBK konzentrieren sich hauptsächlich auf den Einfluss der Konvektion und vernachlässigen Strahlungseffekte, da sie bei niedrigen Arbeitstemperaturen wie beispielsweise beim Arbeitsmedium Wasser oder bei nicht-transparenten Medien wie Flüssigmetallen keinen großen Einfluss auf den Wärmetransport haben (Song et al. 2023). Berücksichtigt man den Strahlungstransport, so ergänzt die Planck-Zahl  $Pl$  das Verhältnis von diffusivem Wärmetransport zur Wärmestrahlung:

$$Pl = \frac{\lambda/H}{4\sigma_{SB}T^3},$$

worin  $\sigma_{SB}$  die Stefan-Boltzmann-Konstante und  $T$  die mittlere Temperatur des Fluides bezeichnen. Im Gegensatz zur Wärmeleitung und Konvektion ist für die Wärmeübertragung durch Strahlung keine Materie nötig. Der Strahlungstransport findet in Form von elektromagnetischen Wellen statt (Modest 2013). Die Strahlung, welche ein Medium durchdringt, wird teilweise reflektiert, absorbiert und gestreut. Dieses Verhalten kann durch die Strahlungstransportgleichung beschrieben werden.

Zu vorliegendem Projekt finden parallel numerische Untersuchungen statt, die die experimentellen Untersuchungen dieser Anwendung ergänzen sollen. Tabelle 1 listet hierfür den Parameterbereich der Untersuchungen. Für den Fall der RBK ist die Nusselt-Zahl damit eine Funktion, welche von der Rayleigh-Zahl, der Prandtl-Zahl, dem Aspektverhältnis und der Planck-Zahl abhängig ist. Diesen Zusammenhang gilt es für Flüssigsalze zu bestimmen:

$$Nu = f(Ra, Pr, \Gamma, Pl).$$

Tab. 1: Parameterbereich für die geplanten experimentellen und numerischen Untersuchungen der RBK in Salzschnmelzen unter Einfluss von Strahlungseffekten.

	$Pr$	$Ra$	$Pl$
200 °C	20	$2 \cdot 10^8$	0,14
400 °C	5	$9 \cdot 10^8$	0,05

Der geplante Versuchsaufbau der mit Salzschnmelze gefüllten RBK-Zelle ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Zwei Temperierplatten aus Kupfer sorgen für isotherme Randbedingungen oberhalb des Schmelzpunktes der verwendeten Salzschnmelze. Die transparenten Seitenwände aus Quarzglas werden bis auf das Sichtfenster für die Messtechnik durch Isolationsmaterial möglichst adiabatisch abgeschlossen. Ein kubisches Volumen wird gewählt, um ein ebenes Sichtfenster zu erhalten. Das Aspektverhältnis der RBK-Zelle beträgt dementsprechend  $\Gamma = 1$ . Das erste Ziel besteht darin, das Strömungsfeld der Salzschnmelze mittels nicht-invasiver Methoden zu bestimmen. Hierfür kommen aufgrund der Transparenz des Mediums Particle-Image-Velocimetry (PIV) und Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) in Betracht. In diesem Beitrag wird ein Vergleich der zwei optischen Messmethoden zur Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes gegeben, sowie anhand der Ergebnisse von Voruntersuchungen die Vor- und Nachteile der zwei Methoden für die Anwendung in Salzschnmelzen erläutert.

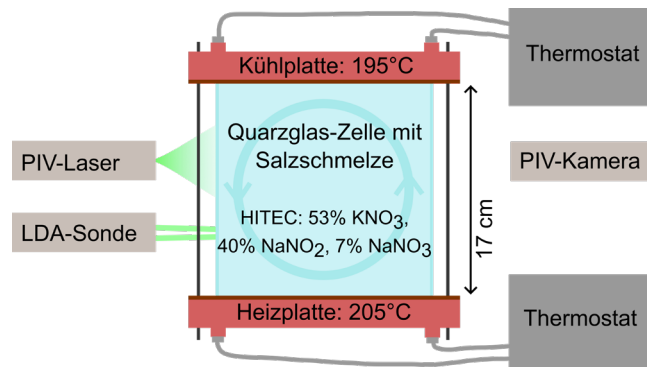


Abb. 1: Geplanter Aufbau der RBK-Zelle zur Untersuchung des Strahlungseinflusses auf den Wärmetransport und die sich ausbildenden Strömungsstrukturen.

## Prinzip und theoretischer Vergleich der optischen Messmethoden

PIV ermöglicht eine berührungslose Bestimmung des instantanen Geschwindigkeitsfeldes mit einer hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung. Es ist notwendig dem Medium Partikel beizufügen, welche der Strömung möglichst optimal folgen und deren Bewegung mit einer Kamera erfasst wird. Zur Detektion der Partikel in einer Ebene werden diese mit Hilfe eines Lichtschnitts, bspw. durch einen Laser mit Lichtschnittoptik, beleuchtet. Die 2D2C-Geschwindigkeitskomponenten innerhalb dieser Ebene werden anhand der Verschiebung der Partikelbilder und des zeitlichen Abstandes von aufeinander folgenden Aufnahmen bestimmt. Der Eingriff in den Versuchsaufbau (Isolation) ist durch die Notwendigkeit eines großen Sichtfensters für die Kamera und die Einkopplung des Lichtschnittes recht hoch (Raffel et al. 2018, Kähler et al. 2016).

LDA benötigt hingegen ein kleineres Fenster zur Einkopplung der zwei kohärenten Laserstrahlen in das Medium. Das ebenfalls nicht-invasive Messprinzip basiert auf der Überschneidung zweier kohärenter Laserstrahlen, in deren Kreuzungsbereich es unter Annahme von ebenen Wellenfronten zur Interferenz kommt. Dementsprechend findet eine punktuelle Bestimmung der Geschwindigkeit von Fluidströmungen statt. Hierfür werden dem Medium ebenfalls Partikel zugesetzt, die beim Durchtritt des Messvolumens periodisch Licht aussenden, welches durch eine Fotodiode erfasst wird. Die charakteristische Frequenz  $f_D$  des ermittelten Signals

entspricht in guter Näherung der Doppler-Frequenzverschiebung und ist proportional zur lateralen Geschwindigkeitskomponente des Partikels ( $v_x$ ):

$$v_x = f_D \frac{\lambda}{2 \sin \theta} = f_D \cdot d.$$

Hierin stehen  $\lambda$  für die Wellenlänge,  $\theta$  für den halben Kreuzungswinkel der Laserstrahlen und  $d$  für die Periodizität der Interferenzstreifen. Durch Kombination von drei LDA-Systemen können punktuell alle drei Geschwindigkeitskomponenten der Strömung erfasst werden (1D3C). Indem bei stationären Strömungsvorgängen mehrere Messpunkte nacheinander abgefahren werden, wird eine Aufzeichnung von Geschwindigkeitsprofilen möglich. Limitierungen dieses Messprinzips sind die Ortsauflösung (Messvolumengröße) und die Geschwindigkeitsunsicherheit, da es sich bei realen Laserstrahlen nicht um ebene Wellenfronten handelt. Es entstehen systematische Messabweichungen mit zufälligem Charakter, da die Änderung des Streifenabstandes systemischer Natur ist und die Partikelposition im Messvolumen nicht bekannt ist. Für genauere Betrachtungen wird hier auf Fachliteratur verwiesen (Albrecht et al. 2003).

Im Wesentlichen unterscheiden sich die zwei optischen Messprinzipien dementsprechend durch das zeitliche und räumliche Auflösungsvermögen. In Salzschnmelzen werden die Strömungsmessmethoden nach Recherchen der Autoren bisher wenig eingesetzt. Yoder et al. (2014) berichtet von nicht erfolgreichen LDA-Messungen in einer FLiNaK-Salzschnmelze aufgrund von unzureichender Partikelverteilung. PIV in Salzschnmelze wurde beispielsweise erfolgreich von Chavez et al. (2021) in kleinem Maßstab umgesetzt, um die Strömung um Helium-Blasen in FLiNaK-Salzschnmelzen für Kernreaktoren der 4. Generation zu untersuchen. Für die Umsetzung in größerem Maßstab mit einem Nitrat/Nitrit-Salzgemisch bleiben daher viele Faktoren bisweilen weitgehend unbekannt und es besteht Bedarf für Voruntersuchungen.

## Versuchsaufbau

Das hier verwendete Medium ist ein Nitrat/Nitrit-Salzgemisch (HITEC, Fernández et al. 2015) mit einer Schmelztemperatur von  $T_s = 142 \text{ °C}$ . Bei einer mittleren Temperatur von  $T_m = 200 \text{ °C}$  stellt sich eine Dichte von  $\rho_f = 1,94 \text{ g/cm}^3$  ein. Die Komponenten Kaliumnitrat ( $\text{KNO}_3$ , 53 mass%,  $\geq 99 \%$ , p.a., ISO), Natriumnitrit ( $\text{NaNO}_2$ , 40 mass%,  $\geq 99 \%$ , krist.) und Natriumnitrat ( $\text{NaNO}_3$ , 7 mass%,  $\geq 99 \%$ , krist.) von der Firma Carl Roth wurden nach dem Abwiegen fein gemörsert und in Pulverform aufgeschmolzen. Die eutektische Mischung wird für mindestens 10 min auf einer Temperatur von  $T_m = 200 \text{ °C}$  gehalten, um den Feuchtigkeitsgehalt zu reduzieren.  $\text{KNO}_3$  wird dabei ohne Antbackmittel verwendet, da die organischen Anteile des Antbackmittels die Transparenz der Salzschnmelze stark vermindern. Eine handgefertigte Quarzglas-Küvette mit einer Glasstärke von 2 mm und den quadratischen Innenmaßen von 5 cm dient als Zelle für die Voruntersuchungen der Strömungsmessungen in Salzschnmelzen. Der Füllstand der Salzschnmelze wird dabei auf etwa 5 cm eingestellt. Abbildung 2 zeigt diese mit der Salzschnmelze gefüllte Quarzglas-Küvette (a) und ein Schema der Voruntersuchung (b). Die Küvette wird durch eine elektrische Heizplatte von unten beheizt. Für die Untersuchung wurde entweder eine konstante Heiztemperatur von  $T_H = 200 \text{ °C}$  eingestellt oder eine mittlere Temperatur der Salzschnmelze von  $T_m = 200 \text{ °C}$  angestrebt. Diese wird mithilfe eines Thermoelementes Typ K auf halbem Füllstand am Rand der Zelle gemessen. Die Seitenwände sind nicht isoliert. Durch die freie Oberfläche werden inhomogenen Oberflächenspannung erwartet, die die Strömungsvorgänge in der Salzschnmelze stark beeinflussen (Marangoni-Konvektion). Diese Kräfte sollen in vorliegenden Voruntersuchungen allerdings nicht Gegenstand der Diskussion sein.

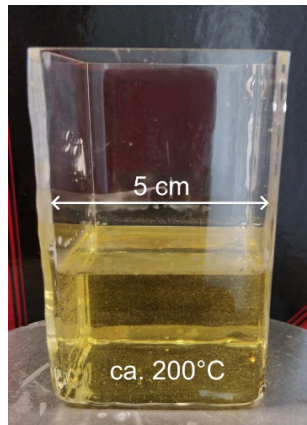
Zur Messung der Strömung werden der Salzschnmelze Hohlgaskugeln (HGK, HGS-10 von Dantec Dynamic) mit 2 bis 20  $\mu\text{m}$  Durchmesser und einer Dichte von  $\rho_p = 1,1 \text{ g/cm}^3$  als Partikel zugesetzt. Der Brechungsindex von Borosilikatglas unterscheidet sich mit  $n_p = 1,52$  von dem der Salzschnmelze mit  $n_s = 1,456$  (Drotning 1977), was entscheidend für die Sichtbarkeit der Partikel ist. Trotz der hohen Dichteunterschiede zwischen Partikel und Salzschnmelze deutet die Stokes-Zahl mit

$$Stk = \frac{\tau_p}{\tau_f} = 3,8 \cdot 10^{-7} \ll 0,1$$

auf ein gutes Folgevermögen der Partikel hin (Raffel et al. 2018). Die Ansprechzeit der Partikel  $\tau_p$  und die charakteristische Freifall-Zeit für thermische Konvektion  $\tau_f$  sind gegeben mit

$$\tau_p = \frac{d_p^2 \rho_p}{18\mu} = 8,26 \cdot 10^{-7} \text{ s} \quad \text{und} \quad \tau_f = \frac{H}{\sqrt{g\beta\Delta TH}} = 2,19 \text{ s.}$$

(a)



(b)

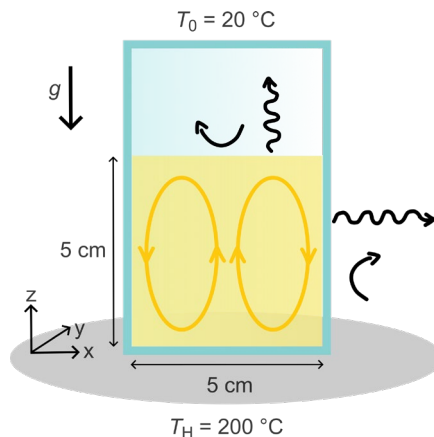


Abb. 2: Quarzglas-Küvette mit Nitrat/Nitrit-Salzschmelze und HGK. Der Füllstand der Salzschmelze entspricht in diesem Bild weniger als 5 cm (a). Schema des Experiments zur Strömungsmessung mittels LDA und PIV in Salzschmelzen (b).

Für die PIV-Messungen dient eine Kamera mit 2560×2160 Pixel Auflösung (Imager sCMOS, LaVision GmbH) und ein Objektiv mit einer Brennweite von 100 mm (Milvus 2/100M, Zeiss) bei einer Messfrequenz von 15 Hz. Für die Belichtung wird ein Nd:YAG-Doppelpuls laser (Quantel, Evergreen) mit einer Wellenlänge von 532 nm eingesetzt. Mit diesem System werden Messreihen mit je 50 Doppel- bzw. Einzelbildaufnahmen und einer Auflösung von 35 px/mm aufgezeichnet. Zum Vergleich wird ein Dauerstrichlaser (ZM18, Z-Laser) mit einer Leistung von  $\leq 40$  mW und einer Wellenlänge von 532 nm verwendet, um eine höhere Bildwiederholungsrate von 30 Hz zu erreichen. Zur Berechnung von Geschwindigkeitsvektoren kommt nach Abzug des gemittelten Minimums ein Kreuzkorrelationsalgorithmus mit Multi-Pass Fast-Fourier-Transformation (FFT) und abnehmender Abfragefenstergrößen von 96×96 zu 32×32 Pixeln mit einer Überlappung von 50 % zum Einsatz. Aufgrund der stationären Strömung wird eine Ensemble-Mittelung der Korrelationsebenen durchgeführt.

Ein LDA-System von DANTEC Dynamics FlowLite mit kohärenten Laserstrahlen der Wellenlänge 532 nm, einer Energie von 30 mJ, einer Brennweite von  $f = 160$  mm und einem Strahlabstand von  $d_{LDV} = 40$  mm dient zur zweiten Strömungsmessung. Es wird lediglich die Geschwindigkeitskomponente in z-Richtung aufgezeichnet (1D1C). Die LDA-Sonde wird auf einer Traverse montiert, welche ein Profil auf mittlerer Höhe im Zentrum der Zelle ( $y = z = 25$  mm) von  $x = 5$  mm bis 45 mm abfährt. Die Randbereiche der Quarzglas-Küvette sind stark wellig und würden zu Krümmung der Strahlen führen. Die Bildaufnahmezeit beträgt für jeden Messpunkt 20 s, sodass genügend Partikel das Messvolumen kreuzen.

## Ergebnisse und Diskussion

Die HGK-Partikel lassen sich gut in der Salzschmelze verteilen. Mit bloßem Auge lässt sich bereits erkennen, dass im Zentrum der Zelle durch die Wärmezufuhr von unten eine Auftriebsströmung entsteht und das Medium am Rand der Zelle durch die sinkende Temperatur und die dadurch erhöhte Dichte absinkt. Eine Sedimentation der Partikel ist nicht zu beobachten.

PIV kann mit einem gepulsten Laser je nach Strömungsgeschwindigkeiten sowohl mit Einzelaufnahmen, als auch im Doppelbildmodus angewendet werden. Die Partikelbilder sind zwischen 2 und 7 Pixel groß und deutlich vom Hintergrund abgehoben. Ebenso sind die Partikelbilder unter Verwendung eines Dauerstrichlasers detektierbar (siehe Rohbild in Abb. 3 (a)). Ein gemitteltes 2D2C-Strömungsfeld der Ergebnisse der Aufnahmen mit gepulstem Laser im „single frame single exposure“ Modus ist in Abbildung 3 (b) dargestellt. Zu erkennen ist eine deutliche Verschiebung des erwarteten Auftriebes im Zentrum der Zelle zur linken Seitenwand. Vermutet wird ein Einfluss der nicht homogenen Heizplatte, sowie eine nicht ebene Bodenfläche der Quarzglas-Küvette. Da diese Messungen lediglich als Voruntersuchungen zur Anwendbarkeit der Messtechnik dienen, soll hier nicht weiter darauf eingegangen werden. Eine maximale Auftriebsgeschwindigkeit von  $U_{\max,PIV} = 16 \text{ mm/s}$  wird gemessen. Die Absinkgeschwindigkeiten sind deutlich geringer, da sich der Bereich des Absinkens über das gesamte Randgebiet der Zelle verteilt.

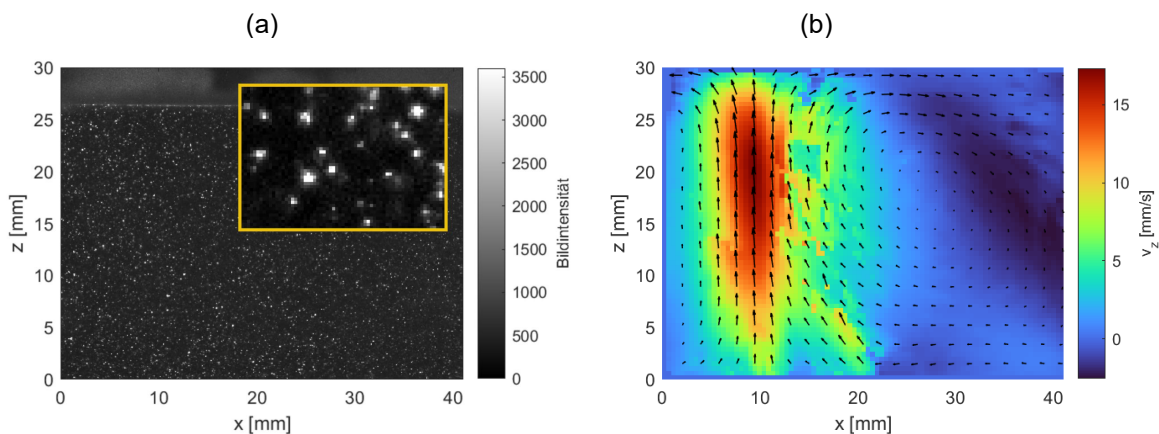


Abb. 3: Gefilterte Rohbildaufnahme und Zoomausschnitt mit Belichtung durch einen Dauerstrichlaser (a). PIV-Ergebnisse der Messung mittels gepulstem Laser bei einer Temperatur der Heizplatte von  $T_H = 200 \text{ °C}$  (b). Die Vektorpfeile zeigen die Richtung der Strömungsgeschwindigkeit an und der Konturplot die Geschwindigkeitskomponente in z-Richtung.

LDA wurde ebenfalls erfolgreich in Salzschnmelzen sowohl ohne, als auch mit Partikel implementiert. Verbleibende Wasserdampfblasen und andere Verunreinigungen in der Salzschnmelze bilden vermutlich genügend Streupunkte im Messvolumen, die zu einem Messsignal führen. Ohne zusätzliche HGK-Partikel ist die Signalstärke jedoch deutlich geringer und es wird empfohlen Partikel hinzuzusetzen, um eine akzeptable Detektionsrate zu erreichen. Abbildung 4 zeigt das mittels LDA ermittelte Profil der über die Messzeit gemittelten Geschwindigkeitskomponente in z-Richtung. Das Konfidenzintervall (KI) der LDA-Messpunkte beträgt maximal  $0,98 \text{ mm/s}$ . Der relative Messfehler liegt am Messpunkt der Maximalgeschwindigkeit bei  $3,6 \%$  und für niedrige Strömungsgeschwindigkeiten bei bis zu  $100 \%$ . Dies deutet auf eine geringe Messgenauigkeit hin. Beim Traversieren der Zelle in x-Richtung ist des Weiteren zu erkennen, dass die Geschwindigkeiten fluktuieren. Eine Erhöhung der Messzeit pro Messpunkt und eine genauere Betrachtung der Messungenauigkeiten ist für spätere Messungen vorgesehen. Die maximale Auftriebsgeschwindigkeit von  $U_{\max,LDA} = 10 \text{ mm/s}$  ist geringer als die mittels PIV ermittelte maximale Geschwindigkeit. Dies ist auf die nicht perfekt reproduzierbaren Bedingungen (verschiedene Versuchsräume mit unterschiedlichen Raumtemperaturen) und die nicht exakt bestimmte Position der Temperaturmessung zurückzuführen. Auch hier ist der Auftrieb zum linken Seitenrand der Küvette verschoben. Dreht man die Quarzglas-Küvette um  $90^\circ$ , so verschiebt sich auch die Position des Auftriebes. Zum Vergleich ist ein Profil der Geschwindigkeitskomponente in z-Richtung der PIV-Messung aus Abbildung 3 (b) auf mittlerer Höhe im selben Diagramm abgebildet. Zu erkennen ist die Ähnlichkeit des Strömungsprofils mit nach außen verschobenem Auftrieb und Absinken des kalten Fluides am Seitenrand der Zelle. Mittels PIV werden deutlich höhere Geschwindigkeiten detektiert und der Bereich des größten Auftriebes ist weiter nach außen verschoben, was ebenso den nicht perfekt reproduzierbaren Messbedingungen zuzuschreiben ist.

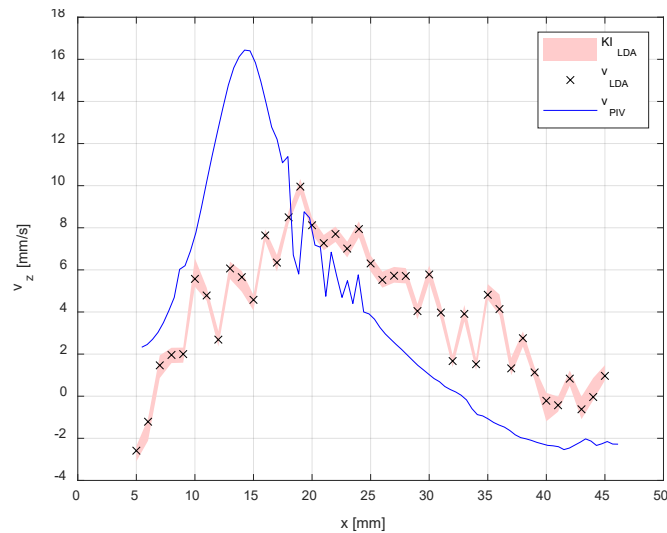


Abb. 4: Ergebnisse der LDA-Messungen in der Salzschnmelze bei einer mittleren Temperatur von  $T_m = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ . Gegeben sind die Mittelwerte der gemessenen Geschwindigkeitskomponenten in z-Richtung und der Konfidenzintervall (KI) der jeweiligen Messpunkte. Zusätzlich ist das Profil der Geschwindigkeitskomponente in z-Richtung der PIV-Ergebnisse in mittlerer Zellenhöhe abgebildet.

## Fazit

Im vorliegenden Beitrag wird gezeigt, dass Particle-Image-Velocimetry (PIV) und Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) in Salzschnmelzen erfolgreich implementiert werden können. Die Ergebnisse der Voruntersuchungen in einer nach oben offenen Quarzglas-Küvette auf einer elektrisch beheizten Herdplatte werden verglichen und zeigen eine ähnliche Strömungsform. Mittels PIV wird eine maximale Geschwindigkeit von  $U_{\max,PIV} = 16 \text{ mm/s}$  und mittels LDA eine maximale Geschwindigkeitskomponente in z-Richtung von  $U_{\max,LDA} = 10 \text{ mm/s}$  ermittelt. Die Messbedingungen der Untersuchungen sind nicht perfekt reproduzierbar. In beiden Ergebnissen ist eine Verschiebung des Auftriebs vom Zentrum hin zu einer Seitenwand zu erkennen. Dies wird auf den Einfluss der nicht homogenen Herdplatte, sowie eine nicht ebene Bodenfläche der Quarzglas-Küvette zurückgeführt. Aufgrund der Welligkeit der Kanten der Quarzglas-Küvette können mit beiden Methoden die Geschwindigkeiten im Randbereich nicht exakt erfasst werden. Im Projektmaßstab soll dies verbessert werden.

Im Allgemeinen benötigt PIV ein größeres Sichtfeld als LDV, was im Projektmaßstab zu einer verminderten Isolation und dadurch anderen Randbedingungen führen wird. PIV ermöglicht jedoch instantane Strömungsbilder in 2D mit 2C, wohingegen die hier verwendete LDV-Sonde lediglich eine Geschwindigkeitskomponente in einem Messpunkt (1D1C) und bei stationären Strömungsvorgängen unter Verwendung einer Traverse ein Profil aufzeichnen kann. Zukünftig soll eine LDV-Sonde mit der Möglichkeit der Messung von allen drei Strömungskomponenten zum Einsatz kommen. Ultraschall-Doppler-Velocimetry (UDV) könnte eine weitere nicht-invasive Messmethode darstellen. Es wird jedoch bevorzugt PIV anzuwenden, um instantane Strömungsfelder aufnehmen zu können, solange es möglich ist ein Sichtfenster beizubehalten.

Nächste Schritte sind die Untersuchung des Einflusses der thermischen Strahlungseffekte auf den Stoff- und Wärmetransport, indem die Versuche bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt werden. Bei höheren Temperaturen werden Isolation und Thermostate für definierte Randbedingungen nötig. Ebenso wird UDV als Methode zur Bestimmung der Geschwindigkeit getestet und Partikel mit einer passenderen Dichte eingesetzt. Parallel soll mittels Temperatursonden das Temperaturprofil aufgezeichnet und zusätzlich eine ausführliche Fehlerabschätzung für alle Messverfahren vorgenommen werden.

## Dankesworte

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) unter den Förderkennzeichen KA-1669/5-1 und CI-185/15-1.

## Literatur

**Ahlers, G., Grossmann, S., Lohse, D., 2009:** "Heat transfer and large-scale dynamics in turbulent Rayleigh-Bénard convection", *Rev. Mod. Phys.*, Vol. 81, No. 2, pp. 503–537.

**Albrecht, H.-E., M. Borys, N. Damaschke, C. Tropea, 2003:** „Laser Doppler and phase Doppler measurement techniques“, Springer-Verlag, Berlin.

**Alva, G., Lin, Y., Fang, G., 2018:** "An overview of thermal energy storage systems", *Energy*, Vol. 144, pp. 341–378.

**Bauer, T., Odenthal, C., Bonk, A., 2021:** "Molten Salt Storage for Power Generation", *Chem. Ing. Tech.*, Vol. 93, No. 4, pp. 534–546.

**Bodenschatz, E., Pesch, W., Ahlers, G., 2000:** "Recent Developments in Rayleigh-Bénard Convection", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 32, No. 1, pp. 709–778.

**Chavez, D. E., Yang, S. R., Vaghetto, R., Hassan, Y. A., 2021:** "Experimental investigation of single helium bubbles rising in FLiNaK molten salt", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 92.

**Drotning, W. D., 1977:** "Optical properties of a solar-absorbing molten salt heat transfer fluid", Sandia Laboratories - energy report, Office of Scientific and Technical Information.

**Fernández, A. G., Galleguillos, H., Fuentealba, E., Pérez, F. J., 2015:** "Thermal characterization of HITEC molten salt for energy storage in solar linear concentrated technology", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 122, No. 1, Springer.

**Kähler, C. J., Astarita, T., Vlachos, P. P., Sakakibara, J., Hain, R., Discetti, S., Foy, R. L., Cierpka, C., 2016:** "Main results of the 4th International PIV Challenge", *Experiments in Fluids*, Vol. 57, No. 6, Springer.

**Modest, M. F., 2013:** "Radiative Heat Transfer", Academic Press.

**Otto, H., Cierpka, C., 2021:** "Influence of thermal stratification on vertical natural convection - Experimental investigations on the example of thermal energy storage systems", *Physics of Fluids*, Vol. 33, No. 8, AIP Publishing, p. 083614

**Raffel, M., Willert, C. E., Scarano, F., Kähler, C. J., Wereley, S. T., Kompenhans, J., 2018:** "Particle Image Velocimetry", Springer.

**Lord Rayleigh, 1916:** "On convection currents in a horizontal layer of fluid, when the higher temperature is on the under side", *Philosophical Magazine and Journal of Science*, Vol. 32, No. 192, pp. 529-546.

**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*, Vol. 144, No. 106784

**Tetreault-Friend, M., Gray, L. A., Berdibek, S., McKrell, T., Slocum, A. H., 2017:** "Optical properties of high temperature molten salt mixtures for volumetrically absorbing solar thermal receiver applications", *Solar Energy*, Vol. 153, pp. 238–248.

**Yoder, G. L., Heatherly, D. W., Williams, D. F., Elkassabgi, Y. M., Caja, J., Caja, M., Jordan, J., Salinas, R., 2014:** "Liquid Fluoride Salt Experimentation Using a Small Natural Circulation Cell", Office of Scientific and Technical Information, US.