



DLR

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt
German Aerospace Center

ETH zürich | **EPSE**

The present work was submitted to the Chair of Energy and Process Systems Engineering

Conception and layout of a measuring cell to determine heat transfer coefficients in molten salt

Master's Thesis

presented by

Kaspar Jeroen Bühner

Supervisors:

Dr.-Ing. Jana Stengler (DLR)

Dr.-Ing. Dennis Roskosch (ETH Zürich)

Examiner:

Prof. Dr.-Ing. André Bardow (ETH Zürich)

Stuttgart, March 24, 2022

Abstract

Charging molten salt-based sensible heat storage systems by using electrical resistance fluid heaters is a promising technology with the potential to be a key component on the global pathway towards a renewable energy supply. It can be applied either to complement existing thermal energy storage systems of concentrated solar power plants or as stand-alone, large scale energy storage systems. The forced convective heat transfer process between electrical resistance fluid heaters and molten solar salt needs to be known in detail in order to be able to design efficient and cost-effective fluid heaters for this application.

As empirical correlations for forced convective heat transfer processes have been found to be invalid for molten salt at high Reynolds and Nusselt numbers, detailed investigations of the heat transfer processes in flow conditions characteristic for electrical fluid heaters are needed.

This thesis develops a layout of a measuring cell, that allows the determination of heat transfer coefficients in molten solar salt, locally resolved around the circumference of a heating rod. This is achieved by deducing a characteristic flow configuration typical for fluid heaters and designing a heater cell geometry that allows measurements in this conditions. Additionally are applicable measuring methods and equipment evaluated and suggested, especially to be able to measure the wall temperature of a heating rod in a molten salt flow.

The investigation has shown that a cross-flow configuration of a single cylinder is representative for typical flow conditions in an electrical resistance fluid heater. A geometry including an electrical cartridge heater leading to these conditions has then been designed and optimized using numerical methods and by developing approaches to quantify how well the wanted conditions are met. Numerical simulations of the resulting geometry, including a representation of the cartridge heater, have then shown that the placement of a metal tube with a low thermal conductivity around the cartridge heater is needed to allow a locally resolved measurement of the heater's surface temperature, which is needed to evaluate the wanted heat transfer coefficients. Analyzing the error propagation of the potential measurement errors of all quantities needed to discuss the heat transfer have shown that the main contributor to uncertainties in the Nusselt number are caused by large uncertainties in material properties.

Zusammenfassung

Das Beladen von Solarsalz basierten sensiblen Wärmespeichersystemen mit Hilfe von elektrischen Widerstandsheizern hat das Potenzial, eine Schlüsseltechnologie auf dem Weg zu einer erneuerbaren Energieversorgung zu sein. Widerstandsheizer könnten dabei sowohl zur Ergänzung existierender thermischer Energiespeicher in solarthermischen Kraftwerken als auch in neuen Wärmespeicherkraftwerken zur Energiespeicherung im grossen Massstab eingesetzt werden. Um effiziente und kostenoptimierte Heizer für solche Anlagen auslegen zu können, ist eine genaue Kenntniss der Nusselt-Zahlen für den Wärmeübergang zwischen Widerstandsheizer und Flüssigsalz von grosser Bedeutung.

Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass die gängigen empirischen Korrelationen zur Abschätzung der Nusselt-Zahlen für flüssige Nitratsalze bei Bedingungen mit hohen Reynolds- und Nusselt-Zahlen nicht gelten. Deshalb werden detaillierte Untersuchungen des Wärmeübergangsprozesses für in elektrischen Widerstandsheizern für in Flüssigkeiten typischerweise auftretende Strömungsbedingungen benötigt.

In dieser Arbeit wird ein Konzept für eine Messzelle vorgeschlagen, die es ermöglicht, Wärmeübergangskoeffizienten in lokaler Auflösung um den Umfang des Heizers zu messen. Dazu wird eine Heizzelle entwickelt, die Messungen bei für Flüssigkeitserhitzern charakteristischen Strömungsbedingungen erlaubt. Zudem werden mögliche Messmethoden sowie Messequipment vorgeschlagen, im Speziellen für eine Temperaturmessung an der Oberfläche des Heizstabes in der Flüssigsalzströmung.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Queranströmung eines einzelnen Zylinders als repräsentativ für die Strömungsbedingungen in einem Widerstandsheizer für Flüssigkeiten angesehen werden kann. Eine Heizzellengeometrie, die zu einer solchen Queranströmung führt, wurde mit Hilfe von numerischen Simulationen entwickelt und optimiert. Dazu wurden Methoden entwickelt, um quantifizieren zu können ob die gewünschten Bedingungen erreicht werden. Weitere numerische Simulationen der optimierten Geometrie, ergänzt mit einem Modell des eingesetzten Heizstabes, haben dann gezeigt, dass die Oberflächentemperatur des Heizers durch Einsatz eines Hüllrohres mit niedriger Wärmeleitfähigkeit gemessen werden könnte. Eine Analyse der Fehlerfortpflanzung von Messfehlern der einzelnen Einflussgrössen auf die Nusselt-Zahl haben zudem gezeigt, dass der grösste Anteil des Gesamtfehlers von Unsicherheiten der Stoffdaten der eingesetzten Materialien stammt.

Contents

Nomenclature	ix
1. Introduction	1
1.1. Thesis outline	2
2. Theoretical Background	4
2.1. Thermal energy storage	4
2.1.1. Sensible heat storage	5
2.1.2. Other thermal energy storage technologies	6
2.2. Molten solar salt as heat transfer- and thermal energy storage medium	7
2.2.1. Thermal properties	8
2.2.2. Corrosion	11
2.3. Forced convection heat transfer	12
2.3.1. Heat transfer coefficient	12
2.3.2. Nusselt number	13
2.3.3. Empirical correlations for forced convective heat transfer	14
2.4. Measuring methods	15
2.4.1. Temperature measurement	15
2.4.2. Power measurement	17
2.4.3. Flow measurement	18
2.4.4. Uncertainty analysis and error propagation	19
3. State-of-the-Art and Scope of this Work	21
3.1. Electrical resistance fluid heaters	21
3.2. Heat transfer coefficient measurement	24
3.2.1. Measurements in cross-flow configurations	25
3.2.2. Measurements on molten salt	26
3.3. Scope of this work	27

4. Pre-Design and Measuring Equipment	29
4.1. Conceptual design heater cell	29
4.1.1. Boundary conditions test facility	29
4.1.2. Characteristic flow conditions	30
4.1.3. Heat source	32
4.1.4. General layout	34
4.2. Measuring equipment	36
4.2.1. Flow measurement	37
4.2.2. Power measurement	38
4.2.3. Temperature measurement	38
5. Numerical Simulations	43
5.1. Model set-up	43
5.1.1. Boundary conditions, evaluation methods and operating point	44
5.1.2. In- and outlet geometry simulation	45
5.1.3. Heater shell simulation	54
5.1.4. Material property implementation	55
5.1.5. Turbulence model	56
5.1.6. Mesh study and convergence criteria	57
5.2. Simulation results	58
5.2.1. Inlet geometry	58
5.2.2. Outlet geometry	62
5.2.3. Heater shell simulation	67
6. Test Bench Layout and Measuring Procedure	75
6.1. Test bench layout	75
6.2. Target function derivation and uncertainty analysis	78
6.3. Proposed measuring procedure	81
6.3.1. Water test loop	81
6.3.2. Measuring series	82
7. Conclusion and Outlook	85
Bibliography	88

A. Appendix	96
A.1. TESIS:com test facility schematic	96
A.2. Heatercell dimension analysis	97
A.3. Standardized thermocouple material combinations	98
A.4. Thermal conductivities solid materials	99
A.5. Drawing heater cell	101
A.6. Drawing heater shell	102