

Diss. ETH No. 18690

# **Oscillating Flow Liquid Cooling for High Performance Computing Systems**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

DOCTOR OF SCIENCES

presented by

RETO WÄLCHLI

Dipl. Masch.-Ing. ETH

born on October 27, 1978

citizen of Zürich and Brittnau, Switzerland

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Dimos Poulikakos, examiner

Prof. Dr. Kostantinos Boulouchos, co-examiner

Dr. Bruno Michel, co-examiner

2009

## **Summary**

The scope of the thesis at hand is to characterize and develop a novel thermal management system for high performance electronic equipment. Under the constraint of a low form factor device, a self-contained, hermetically sealed, liquid heat spreading system was pursued to outperform the cooling potential of present-day technologies. Furthermore, it should facilitate a soft transition to liquid cooling by means of a hybrid system; the combination of high-performance liquid cooled microchannel heat sinks with conventional air cooling. Efficient waste heat spreading from the heat source via a microchannel heat absorber, and the interconnecting tubes, to the large-area heat dissipator cold plate devices is established by means of an oscillating fluid flow regime generated from a set of reciprocating pumps. The fluid contained in the system is kept to a minimum amount of several milliliters to limit a potential damage in the case of leakage. A secondary cooling loop, established either with conventional finned air heat sinks or another liquid flow, is thermally connected to the primary heat spreading system.

The thesis provides a thorough description and characterization of the above delineated liquid cooling heat spreading system. However, the focus lies in the description of the heat and mass transfer within this dynamically-acting heat spreading system with regard to the characteristic measures of frequency and fluid displacement and the design of the mesh-type microchannel cold plates. The secondary cooling loop, dumping heat to the environment, and the fluid displacement pumps are introduced pragmatically with the objective of exploring the performance of the respective liquid heat spreading technology.

Chapter Two describes an efficient modeling approach that allows one to determine the fluidic and thermal performance of microchannel cold plates. Starting from local microchannel-scale numerical modeling, unit cell performance measures are determined. Velocity-dependent pressure losses and heat transfer coefficients are identified to characterize microchannel heat transfer meshes of different porosities. A global chip-scale network model is discussed which predicts the efficiency of such heat transfer devices in steady-state flow conditions. The analytical and numerical results are verified with experimental work.

In Chapter Three, a full-system numerical simulation studies the fluidic and thermal performance of the self-contained, oscillating liquid cooling heat spreading system. The characteristic properties of microchannel cold plate unit cells with various as-

pect ratios are implemented into a simplified porous media model. The dependency of the overall system performance on the heat transfer mesh porosity, the oscillation frequency, and the fluid displacement are investigated and discussed. This allows one to appraise the driving parameters and to estimate the performance limitations of the according cooling apparatus. The conclusions of this numerical work constrict the frequency range to  $0.5 \leq f \leq 2$  Hz and the relative fluid displacement to  $1 \leq \bar{A} \leq 1.5$ . Frequencies of  $f \geq 10$  that would enable superior heat transfer rates in such a reciprocating fluid flow system are impossible to manage with regard to a reasonable pumping work. A large fluid displacement and low frequency driving regime proves to be the most effective. Furthermore, the requested cooling performance defines the optimal design of the microchannel heat transfer mesh.

The next chapter, Chapter Four, examines the experimental implementation of the according technology. A test setup containing the absorber/dissipator microchannel cold plates, the interconnecting tubes, and the displacement pumps is built. A heater/sensor chip is adopted to simulate a high power density microprocessor. The thermal and fluidic characteristics are presented in a time-resolved and cycle-averaged manner. A peak cooling performance from chip to the thermodynamic ground potential of  $180 \text{ W/cm}^2$  ( $\Delta T = 67 \text{ K}$ , fluid pumping power  $1 \text{ W}$ ) is demonstrated experimentally. Two different oscillation regimes, called *linear* and *radial*, are investigated. In terms of temperature cycling, radial oscillations are advantageous at some local points on the chip. However, *linear* is preferable from a performance perspective and it is of lower complexity.

Chapter Five covers the combination of numerical and experimental work on an oscillating liquid heat spreading system. The geometrical constraints are bound to an existing vapor chamber heat sink device that is implemented in one of IBM's server systems. Therefore, the self contained microchannel absorber/dissipator heat transfer mesh is intended to be integrated into the base of the appropriate air heat sink. The effective conductivity, the heat spreading improvement and the thinning potential of the air heat sink base over a passive system, are discussed.

## **Zusammenfassung**

Das Ziel der vorliegenden Doktorarbeit ist die Charakterisierung und Entwicklung eines neuartigen Wärmemanagementsystems für hochleistungsfähige, elektronische Geräte. Unter der Bedingung eines flachen Formfaktors wurde der Ansatz eines in sich hermetisch geschlossenen Mikrokanalkühlsystems verfolgt, welcher die Effizienz der gegenwärtigen Technologien deutlich übertreffen sollte. Zudem ist es das Ziel mit dem vorliegenden hybriden Kühlssystem die Überleitung zu reiner Flüssigkühlung zu vereinfachen; dies bedeutet eine Kombination von mikrokanalbasierten Hochleistungsflüssigkühlern und konventionellen Luftkühlern. Effiziente Wärmeverteilung vom Mikroprozessor via absorbierende und dissipative Wärmetauscher wird mittels eines oszillierenden, primären Flüssigkühlkreislaufs erstellt. Das Fluid wird über oszillierende Verdrängerpumpen transportiert. Das Flüssigkeitsvolumen ist auf wenige Milliliter beschränkt, um den möglichen Schaden im Fall einer Leckage in Grenzen zu halten. Ein sekundärer Kühlkreislauf, welcher entweder durch herkömmliche Luftkühlung oder aber durch Flüssigkühlung realisiert ist, ist thermisch an den Primärkreislauf gekoppelt.

Die Doktorarbeit liefert eine umfassende Beschreibung des obengenannten Wärmeverteilsystems, wobei die Analyse des Wärme- und Stoffaustausches dieses dynamischen Systems im Mittelpunkt steht. Es werden vorwiegend die charakteristischen Systemparameter wie Frequenz, Fluidhubvolumen und das Design der Mikrokanalstrukturen besprochen. Der sekundäre Kühlkreislauf, welcher die Abwärme mit der Umgebung austauscht, sowie die Verdrängerpumpen werden in pragmatischer Weise behandelt, mit der Absicht, das Leistungsvermögen des primären Wärmeverteilsystems zu untersuchen.

Kapitel Zwei beschreibt einen Modellierungsansatz, welcher es erlaubt, die Effizienz von Mikrokanalkühlern abzuschätzen. Ausgehend von numerischen Modellierungen auf der Basis der Mikrokanalstrukturen, wurde die Leistungsfähigkeit der Einheitszelle ermittelt. Der geschwindigkeitsabhängige Druckverlust als auch der Wärmeübergangskoeffizient für unterschiedliche Porositäten des gewebeartigen Mikrokanalkühlers wurden identifiziert. Weiterführend wurde ein Netzwerkmodell entwickelt, um die Effizienz auf der Ebene des Mikrokanalkühlers abzuschätzen. Die numerischen und analytischen Resultate wurden zudem mit experimentellen Messdaten verifiziert.

In Kapitel Drei wurde eine numerische Simulation durchgeführt, welche den Wirkungs-

grad des gesamten oszillierenden Flüssigkühlssystem untersucht. Die charakteristischen Eigenschaften der Mikrokanalkühler-Einheitszelle für unterschiedliche Aspektverhältnisse wurden in ein vereinfachtes Modell des porösen Materials eingesetzt. Die Abhängigkeit der Systemleistung von Porosität, Frequenz und Fluidhubvolumen wurden untersucht und diskutiert. Dies ermöglichte die Festlegung des Bereichs der Betriebsparameter und eine Abschätzung der maximalen Kühlleistung. Die entsprechenden Schlussfolgerungen beschränken den Frequenzbereich auf  $0.5 \leq f \leq 2$  Hz und das relatives Hubvolumen auf  $1 \leq \bar{A} \leq 1.5$ . Frequenzen  $f \geq 10$ , bei welchen ein deutlich verbesserter Wärmeübergang in einem entsprechenden oszillierenden Flusssystem zu erwarten wären, sind im Rahmen einer realistischen Pumpleistung (z. B.  $p < 2$  bar) nicht zu erzielen. Ein grosses Fluidhubvolumen und eine geringe Frequenz erwiesen sich als am Effektivsten. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass die geforderte und entsprechend spezifizierte Kühlleistung massgeblich das Design des Mikrokanalkühlers bestimmt.

Kapitel Vier behandelt die experimentelle Umsetzung der entsprechenden Wärmeverteiler-Technologie. Ein Teststand, welcher die Absorber- und Dissipator-Kühlerplatten, die Verbindungsrohrleitungen, die Verdrängerpumpen beinhaltet, wurde gebaut. Der Hochleistungs-Mikroprozessor wurde mittels Heizer/ Sensor Chip eingesetzt. Die thermischen und fluidodynamischen Betriebsleistungen werden entsprechend zeitaufgelöst und zyklusgemittelt präsentiert. Eine maximale Kühlleistung von der Wärmequelle zum thermodynamischen Grundpotential von  $180 \text{ W/cm}^2$  ( $\Delta T = 67$  K, Pumpleistung 1 W) konnte experimentell nachgewiesen werden. Zwei unterschiedliche Flussmuster, *linear* und *radial*, wurden untersucht. Dabei zeigen sich gewisse Vorteile bei *radial* auf lokalen Stellen auf dem Chip. Insgesamt zeigte aber *linear* die bessere Leistung und weist als System einen geringeren Grad an Komplexität auf.

Kapitel Fünf berichtet von einer experimentellen und numerischen Arbeit mit einem leicht modifizierten oszillierenden Wärmeverteilersystem. Die geometrischen Rahmenbedingungen beziehen sich dabei auf ein existierendes Küplersystem, welches in einem von IBM's Serversystemen zum Einsatz kommt. Dafür wurde das hermetisch geschlossene Absorber/Dissipator-Wärmeverteilsystem in die Grundplatte eines Luftkühlers integriert. Die effektive Wärmeleitfähigkeit, die Wärmeverteiloptimierung und das Potential zur Bauhöhenreduktion gegenüber einem passiven Kühlsystem werden diskutiert.