



Doctoral Thesis

Integrated liquid cooling with heat reuse A new generation of energy efficient computers and photovoltaics

Author(s):

Zimmermann, Severin

Publication Date:

2013

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-009930419> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 21006

INTEGRATED LIQUID COOLING
WITH HEAT REUSE:
A NEW GENERATION
OF ENERGY EFFICIENT
COMPUTERS AND PHOTOVOLTAICS

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree
DOCTOR OF SCIENCES

presented by

Severin Zimmermann

MSc. Physics ETH Zurich

born December 31, 1984
citizen of Ennetbürgen (NW), Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Dimos Poulikakos, examiner

Dr. Bruno Michel, co-examiner

Dr. Manish K. Tiwari, co-examiner

2013

Abstract

The topic of this doctoral thesis is energy efficient electronic cooling using hot water as coolant. The aim of the work is to provide a viable solution to reduce the energy spent for cooling supercomputers and allow energy reuse for secondary applications. A transition from air cooling to single phase liquid (water) cooling is proposed to master the challenge of ever increasing heat dissipation densities in electronic components. Due to its superior thermal characteristics over the traditional air cooling, single phase liquid cooling of electronic components is now a well-recognized and practically unavoidable alternative to address rising heat dissipation densities. The thermal conductivity of water is by a factor of 24 higher and its volumetric heat capacity is by a factor of more than 3000 larger than that of air. Hence, the thermal resistance in water cooled solutions is reduced and the necessary temperature differential for efficient heat removal is drastically lowered. The resulting reduction in the required temperature difference between the coolant and the electronics allows the use of hot water for efficient heat removal. The use of hot water enables heat removal by passive heat exchangers towards the ambient or a secondary user of the heat. Therefore energy intensive chillers previously required to pre-cool the air become obsolete and the overall energy spent for cooling is almost cut in half. A compact thermal model to determine junction temperatures of microchips is developed and experimentally verified. The model is used to demonstrate that the application of a flow-control feedback loop could achieve a further reduction of the energy spent for cooling purposes. A microchannel manifold heat sink is used to experimentally demonstrate the feasibility of hot water cooled electronics. The microchannel manifold heat sink under investigation is a realistic, scalable design of a water cooled heat sink which is already included in a prototype hot water-cooled IBM BladeCenter QS22 / HS22 cluster named Aquasar. Aquasar represents an important stepping stone toward energy-aware computing because it directly repurposes excess heat for the university buildings. It is shown that water temperatures as high as 60°C are sufficient to cool microprocessors with over 90% 1st law (energy based) efficiency. However, using

0. Abstract

only energy as a measure to identify the benefits of such a system can be misleading because the quality of different kinds of energy is very different. Therefore, the system analysis has to be performed in terms of thermodynamic exergy which is a better reflection on the potential for energy reuse. An exergy analysis shows that a six fold rise in 2nd law (exergy based) efficiency is achieved by switching water inlet temperature from 30°C to 60°C. In a second step, energy and exergy efficiencies of the whole Aquasar system are investigated to locate the major points of exergy destruction. The prototype also has an air cooled part to help compare the coolant performances and thereby underscore the benefits of the hot water cooling approach. A heat recovery efficiency of 80% and an exergetic efficiency of 34% are achieved with a water temperature of 60°C. Heat losses to the ambient and due to the presence of air cooled components such as power supplies are the limiting factor for both efficiencies. The resulting high exergy at the system outlet is a measure of the potential usefulness of the waste heat of data centers. This waste could be used and help to design data centers with minimal carbon footprint. A novel concept of economic value of heat was introduced to evaluate different reuse strategies such as space heating or refrigeration using adsorption chillers. This new concept shows that the economic value of the heat recovered from data centers can be much higher than its thermodynamic value. Converting previously air cooled components to become part of the liquid cooling loop is the next step to completely eliminate air as coolant in supercomputers. The feasibility of power supplies fully immersed in dielectric fluids is demonstrated experimentally as a part of this thesis. This allows the elimination of any air flow through the supercomputer and a direct connection to the server cooling loop in order to recover the heat dissipated in the power supplies.

In a final step, the concept of hot water cooling is extended to cool photovoltaic cells. The microfluidic features of manifold microchannel heat sinks used to cool processors are also ideally suited to cool photovoltaic cells. The requirement of efficient heat removal is very similar in both fields. Therefore, an extension from hot water cooled electronics to hot water cooled photovoltaics is straightforward. The benefits of advanced thermal packaging are demonstrated through a receiver package consisting of a monolithic interconnected module which is directly attached to a high performance microchannel heat sink. The energy efficiency of the package increases four times when the thermal power is considered in addition to the electric power. An exergy analysis of the photovoltaic cell underscores advantages of the new cooling approach and concludes this thesis.

Zusammenfassung

Energieeffiziente Kuehlmethoden auf der Basis von heissem Wasser sind das Thema dieser Doktorarbeit. Ziel dieser Arbeit ist es einen Weg aufzuzeigen, wie man die noetige Pumpenergie fuer Kuehlkreislaeufe reduzieren und gleichzeitig Abwaerme nutzbar machen kann.

Ein Wechsel von Luft- auf Wasserkuehlung wird untersucht um die steigenden Waermestroeme in elektronischen Komponenten kontrolliert abzufuehren. Aufgrund der besseren thermischen Eigenschaften von Wasser (Waermeleitfaehigkeit und spezifische Waermekapazitaet) sind Wasserkuehlungen in vielen industriellen und Technologischen Prozessen eine bereits anerkannte Alternative zu Luftkuehlungen. Ein Wechsel zu Wasserkuehlung wird daher auch in der Computerindustrie unvermeidbar werden. Der Waermewidderstand von Wasserkuehlungen ist bedeutend geringer, so dass grosse Waermemengen mit einem relativ kleinen Temperaturunterschied zwischen Chip und Kuehlmittel abgefuehrt werden koennen. Der verkleinerte Waermeunterschied erlaubt den Einsatz von heissem Wasser (60°C) als Kuehlmittel fuer eine effiziente Waermeabfuhr. Die Waerme in Heisswasser-Kuehlungen kann mit Hilfe von passiven Waermetauschern an die Umgebung oder an einen Abwaerme-Nutzer abgegeben werden. Dadurch wird der Einsatz von energieintensiven Kaelteanlagen ueberfluessig und der Energieverbrauch des Kuehlkreislaufes wird in etwa halbiert.

Ein thermisches Modell fuer die Bestimmung von Chiptemperaturen wurde entwickelt und experimentell verifiziert. Das Modell wird benutzt um zu demonstrieren, dass eine Massenfluss-Koppelung an die Rechnerleistung eine weitere Reduzierung des Energieverbrauchs zur Folge hat. Ein Mikrokanalkuehler mit integriertem Verteilersystem dient Beispiel fuer die Demonstration der experimentellen Umsetzbarkeit einer Heisswasser-Kuehlung von elektronischen Komponenten. Dieser Kuehler benutzt ein skalierbares Design, welches schon im ersten Prototyp eines Heisswasser gekuehlten Rechenzentrums verwendet wird. Der Prototyp heisst Aquasar und repraesentiert einen wichtigen Entwicklungsschritt zu einer besseren Energiebilanz in Rechenzentren durch die Nutzung der Abwaerme fuer die Gebaeudeheizung: Wassertem-

0. Zusammenfassung

peraturen bis 60°C genuegen um Prozessoren zu kuehlen und gleichzeitig 90% der abgefuehrten Waerme zur Wiederverwendung bereitzustellen. Die Betrachtung der Energieeffizienz alleine ist jedoch irrefuehrend, da die Qualitaet der Abwaerme stark temperaturabhaengig ist. Die thermodynamische Groesse Exergie beurteilt die Qualitaet verschiedener Energieformen und ist deshalb ein besseres Mass fuer die Wiederverwendbarkeit der Abwaerme. Eine Exergie-Analyse zeigt eine sechsfache Steigerung der Effizienz durch den Wechsel von Wasser bei 30°C zu Wasser bei 60°C. In einem zweiten Schritt erfolgt sowohl eine Energie als auch eine Exergie Analyse des gesamten Aquasar-Systems um Orte moeglicher Exergie-Vernichtung zu identifizieren. Das Aquasar-System hat auch einen luftgekuehlten Teil um einen Vergleich der beiden Kuehlssysteme zu erleichtern und so die Vorteile einer Heisswasserkuehlung zu unterstreichen. Eine Waermerueckgewinnung von 80% und eine Exergie-Effizienz von 34% wurden bei Wassertemperaturen um 60°C erreicht. Waermeverluste an die Umgebung und die Praesenz eines luftgekuehlten Teils im System waren die limitierenden Faktoren, welche bessere Effizienzen verhinderten. Die erhoehrte Exergie ist ein gutes Mass fuer die Nuetzlichkeit der Abwaerme von Rechenzentren. Die Wiederverwendbarkeit der Abwaerme ist ein wichtiger Schritt in Richtung eines Rechenzentrums mit minimaler CO₂ Bilanz. Ein neues Konzept fuer den oekonomischen Wert der Abwaerme fuer verschiedene Wiederverwendungsarten (Gebaeudeheizung, Entsalzung oder Adsorptionskuehler) wird eingefuehrt. Das Konzept zeigt, dass der oekonomische Wert der Abwaerme wesentlich hoeher sein kann als der thermodynamische gegeben durch Exergie.

Die Energie-Effizienz von Rechenzentren kann verbessert werden, in dem zuvor noch luftgekuehlte Komponenten wie zum Beispiel Netzgeraete umgewandelt und den Wasserkreislauf angehaengt werden. Die Moeglichkeit eines komplett in Mineraloel eingetauchten Netzgeraetes wird experimentell demonstriert. Es wird gezeigt, dass dieses ueberarbeitete Netzgeraet einwandfrei funktioniert und seine Abwaerme direkt an den Wasserkreislauf abgeben kann. Dadurch kann der restlichen Luftfluss in Supercomputer reduziert und die Rueckgewinnung der Abwaerme gesteigert werden.

In letzten Schritt wir das Konzept von Heisswasserkuehlung von elektronischen Komponenten auf die Photovoltaik ausgeweitet. Die Anforderungen von Mikroprozessoren und Photovoltaik-Zellen sind sehr aehnlich, dadurch lassen sich die gewonnen Einsichten direkt uebertragen. Die Vorteile der Verbindung einer Photovoltaik-Zelle und eines Hochleistungskuehlers werden demonstriert. Die Energie-Effizienz einer solchen Verbindung ist viermal hoeher als die Effizienz der Photovoltaik-Zelle alleine. Eine Exergie-Analyse des neuen Systems unterstreicht die Vorteile und bildet den Abschluss dieser Doktorarbeit.