

Problematik der Elektromigration in der Prozessortechnik

Sebastian Müller

Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften
Universität Hamburg

saintdeath@independent-mercenarys.org

ABSTRACT

Elektromigration ist ein altes Problem der Prozessortechnik, das völlig neue Dimensionen erreicht mit den neuen Prozessorgenerationen. Hier soll veranschaulicht werden, warum Elektromigration zunehmend zu einem Brennpunkt in der Prozessortechnik wird und welche Möglichkeiten die Entwickler haben, dieser entgegen zu wirken. Die Elektromigration wird in diesem Paper rein auf Prozessoren bezogen betrachtet.

General Terms

Experimentation, Economics

Keywords

Elektromigration, Hillocks, VapoChill™, Prozessor, CPU, Voids, Prozessor-Entwicklung,

1. Einführung

Elektromigration ist schon immer eine Problematik in der Prozessortechnik gewesen, war jedoch bis zur Pentium 3, bzw. AMD™ K6-2 Generation ein eher zu vernachlässigendes Problem. Mit den neuen Prozessorgenerationen von AMD™ und Intel™ jedoch wird Elektromigration zu einem immer schwerwiegenderem Problem und beschäftigt somit die Forschungsabteilungen der Prozessorhersteller und einige Universitäten. Gesucht wird nach der Lösung für die Elektromigration, die auch für den Endverbraucher preislich vertretbar ist.

Wie weit der Stand der Forschung ist und wie Brisant es um die Problematik der Elektromigration ist, wird auf den folgenden Seiten durchleuchtet.

2. Elektromigration, was ist das?

Elektromigration ist ein physischer Prozess, der die Leiterbahnen von Prozessoren zerstört. Dies geschieht aufgrund der Eigenschaften der Elektronen und des Metalls, welches für die Leiterbahnen verwendet wird. Die Elektronen, die durch die Leiterbahnen des Prozessors strömen, reißen Metallatome aus ihrem Gefüge heraus, welche sich an anderer Stelle wieder absetzen. Der Effekt dieser ‚Wanderschaft‘ der Metallatome ist auch durch die physikalische Ladung der Elektronen und der Metallatome, sowie der Richtung des Elektronenflusses mitbegründet, denn die Elektronen treibt ihre negative Ladung gegen den eigentlichen Stromfluss, was Verwirbelungen des Elektronenstroms und somit stärkere Abnutzung an der Leiterbahn verursacht. Auf diese Weise entstandene Lücken in der Leiterbahnen werden fortan mit ihrer wissenschaftlichen Bezeichnung ‚Voids‘, Ablagerungen als ‚Hillocks‘, zu deutsch Hügelchen, betitelt. Da die Leiterbahnen sehr

dünn sind, hat schon die kleinste Beschädigung sehr große Auswirkungen auf die Funktionsweise auf das Gesamtgefüge. So können Voids die Leiterbahn und somit den Elektronenstrom unterbrechen. Die Leiterbahn wird somit ‚tot‘ und kann einen Ausfall bzw. Folgebeschädigung des ganzen Prozessors auslösen.

Hillocks hingegen verringern den Abstand zwischen den Leiterbahnen und erhöhen somit das Risiko des Überspringens der Elektronen von einer Leiterbahn auf eine nahe liegende, andere Leiterbahn. Der daraus resultierende Kurzschluss kann ebenfalls den Prozessor beschädigen und das System zu einem Absturz bringen. In jeder Weise endet die Elektromigration auf lange Sicht in der Zerstörung des Prozessors. Die Dauer ist abhängig von Faktoren wie der Temperatur, der Spannung, dem Material und der Materialbeschaffenheit.



Hier abgebildet: Zerstörung einer Leiterbahn aus Aluminium durch Elektromigration. Die einzelnen Bilder wurden einer Zeitrafferaufnahme entnommen. Deutlich zu erkennen sind Void (im Bild schwarz) und Hillock (im Bild weiß). Die elektrische Belastung der Leiterbahn in diesem Versuch entsprach in etwa der einer Kupferleiterbahn in einem aktuellen Prozessor mit ca. 1.3V VCore Spannung.

In diesem Beispiel wurde die Leiterbahn komplett unbrauchbar innerhalb kürzester Zeit, woran die Schwäche von Aluminium gegenüber Kupfer deutlich zu erkennen ist.

3. Warum wird Elektromigration erst jetzt zum Problem?

Im Laufe der Jahre wurden Prozessoren immer weiter entwickelt und die Leistung stieg enorm an. Die Transistorzahlen werden immer größer und die Leiterbahnen immer dünner. Gerade diese beiden Faktoren haben erheblichen Einfluss auf die Elektromigration, da sie verantwortlich dafür sind, dass die Spannung an den Leiterbahnen zwar geringer wird, aber die Stromstärke immer höher sein muss. Mehr Transistoren verbrauchen auch mehr Strom, auch wenn diese mit niedrigerer Spannung arbeiten können. Dazu kommt die größere Wärmeentwicklung, die von den vielen Transistoren auf engem Raum ausgeht.

Diese Wärmeentwicklung ist proportional zur Zahl der Transistoren und der Prozessorleistung gestiegen und lag bei frühen Prozessoren (Typ 386) bei unter 10 Watt Verlustleistung. Heutige Prozessoren (Typ 586) reichen bis knapp an die 100 Watt Verlustleistung heran. Ausnahmen bilden die mobilen Prozessoren, die etwa zwischen 25 und 45 Watt Verlustleistung haben.

Die Prozessorentwicklung steht momentan bei 90 nm Fertigungstechnik für den Endverbraucher und wird bis zum Jahre 2020 unter den Nanometer Bereich kommen, sofern neue Wege zur Materialverarbeitung und noch bessere Materialien gefunden werden. Denn das momentan verwendete Kupfer (Cu) ist zwar 100 mal widerstandsfähiger als das früher verwendete Aluminium (Al), wird jedoch auch an seine Grenzen kommen mit den nächsten Jahren. Forschungslabore wie das IFW Dresden haben diese Entwicklung nachvollzogen und forschen bereits, um neue Wege gegen die Elektromigration zu finden. Die Möglichkeiten von Kupfer sind jedoch auf weite Sicht ebenso begrenzt wie die von Aluminium es zuletzt waren.

Das Problem der ansteigenden Wärmeentwicklung wird diesen Effekt sehr verstärken, wie schon im vorhergehenden Teil des Papers erläutert. Das Temperaturproblem lässt sich jedoch prozessorseitig nicht umgehen und auch nicht mindern. Hier ist Innovation in der Kühltechnik für Prozessoren und Computer allgemein gefragt. Eine sehr effektive Technik ist VapoChill™, die im nächsten Abschnitt noch näher erläutert wird, sowie weitere Lösungsansätze in der Kühltechnik. Ob es jedoch realistisch ist die prognostizierten 10 GHz bereits im Jahre 2007 mit herkömmlichen Mitteln effektiv kühlen zu können, ist sehr fraglich. Derzeitige Prozessoren schöpfen die verfügbaren Kühllösungen teils stark aus und hohe Taktraten von über 4 GHz scheinen die Grenzen der Luftkühlung langsam zu brechen.

4. Wie kann man Elektromigration entgegen wirken?

Da Elektromigration ein physikalischer Prozess ist, den man nicht unterbinden kann aufgrund physikalischer Grundregeln, die unabdingbar sind, muss die Wissenschaft ihre Wege finden die Elektromigration zumindest zu reduzieren, um so das Risiko einer Zerstörung des Prozessors durch selbige zu verringern. Möglichkeiten zur Reduktion der Zerstörung der Leiterbahnen durch Elektromigration der aktuellen Forschung sind z.B. Verbesserungen der Fertigungstechnik um Schwachstellen in der Struktur des Metalls zu unterbinden, welche die Ablagerung und das Herauslösen von Metallatomen durch Elektromigration

begünstigen. Jedoch würden diese neuen, verbesserten, aufwändigeren Fertigungsmethoden wohl einen höheren Kostenfaktor für den Endverbraucher darstellen, was die Erwerbsfreudigkeit der Kunden reduzieren wird.

Eine weitere Möglichkeit an der geforscht wird bilden neue Materialien, die noch widerstandsfähiger als Kupfer sind und den hohen Belastungen durch die Elektromigration standhalten können. Grundbedingung ist jedoch, dass diese mindestens genau so leitfähig sind und nicht unermesslich viel kosten. Letzteres setzt momentan in dieser Richtung das Limit für den Fortschritt, da moderne Prozessorlösungen nicht wesentlich teurer werden sollen als die jetzigen, auch wenn es seit dem Vertrieb von Prozessoren an Privatanwender einen starken Preisanstieg gegeben hat und dieser auch weiterhin anhält.

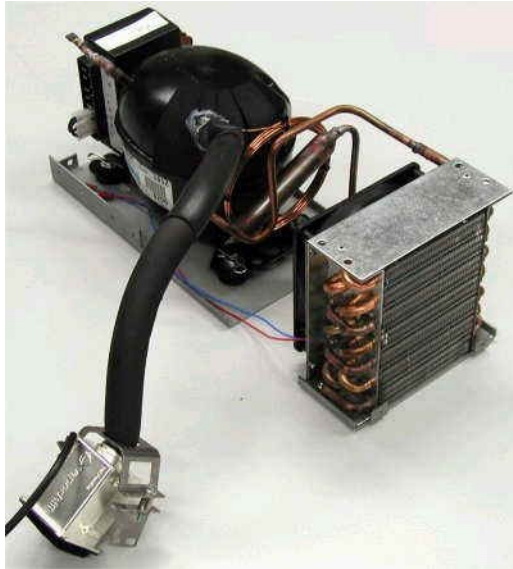
Wiederum eine sehr effektive Lösung wäre die erneute Senkung der VCore Spannung neuer Prozessoren, da diese einen Hauptteil der Belastung für die Leiterbahnen darstellt, jedoch kann diese nicht unendlich gesenkt werden, da die immer größer werdenden Mengen an Transistoren auch immer mehr Strom benötigen werden, was auch in dieser Richtung wieder eine Grenze setzt.

Eine sehr effektive Lösung um kommenden, wie auch aktuellen Prozessoren den Weg frei zu machen und der Elektromigration bedingt Einhalt zu gebieten ist die effektive Kühlung des Prozessors. Leider reichen Luftkühlsysteme nicht mehr immer aus und somit ist auf diesem Markt eine Reihe neuer Systeme zu finden, wie z.B. Wasserkühlungen oder das sehr effektive VapoChill™ System. Früher waren auch Stickstoffkühlungen bedingt verbreitet, welche jedoch aufgrund ihrer Eigenschaft umliegende Teile des Prozessors aufgrund ihrer starken Kälteausstrahlung zu beschädigen oder Kondenswasser zu bilden recht zeitig wieder den Markt verließen und heute nur für Experimente eingesetzt werden.

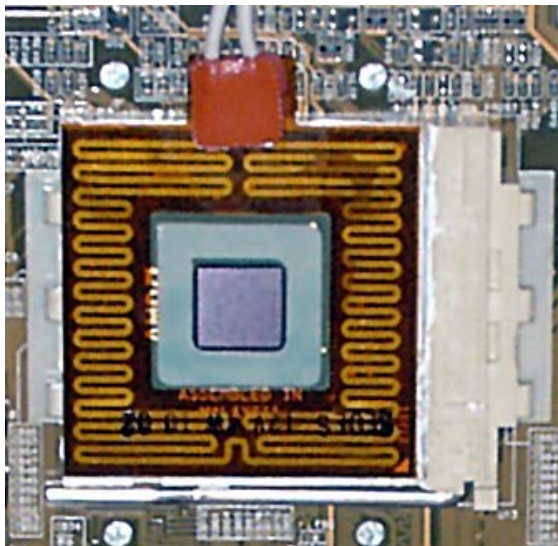
4.1 Was ist VapoChill™?

VapoChill™ ist ein spezielles Kühlsystem, welches fest im oberen Teil spezieller Gehäuse für diese Technik seinen Platz findet. Es basiert auf dem Prinzip des Kühlschranks und kühlt seine Kühlflüssigkeit zusätzlich mit einem aktiven Gehäuselüfter, welcher vor einem geschlungenem Röhrenkomplex sitzt, durch welchen die Kühlflüssigkeit, wie beim Kühlschrank, zum Abkühlen strömt. Die erreichten Temperaturen mit VapoChill™ liegen bei aktuellen Prozessoren bei Firmenvorgegebener Taktung bei -40°C bis -30°C, je nach Wärmeentwicklung der übrigen Systemkomponenten und Gehäusebelüftung.

Bei derartigen Temperaturen muss der komplette Sockel inklusive des Prozessors mit Silikonwärmeleitpaste eingeschmiert werden und ein spezielles Heizaggregat verbaut werden, welches dafür sorgt, dass kein Kondenswasser entsteht. Die Gehäuse für die VapoChill™ Technik werden zusammen mit den Kühlaggregaten verkauft, da die normalen ATX genormten Gehäuse meist nicht über genug Platz für die Aufnahme eines VapoChill™ Kühlaggregates haben. Eingebaut in die Gehäuse werden digitale Temperaturanzeigen und weitere Gehäusekühlungen leisester Güteklasse, um die Geräuschentwicklung auf einem Minimum zu halten. Leider kostet schon das günstigste VapoChill™ Set knapp 500€ und ist somit für den Normalverbraucher erheblich zu teuer. Teure VapoChill™ Kühllösungen hingegen kosten bis zu 1500€, kühlen aber entsprechen stärker.



Hier abgebildet ist ein VapoChill™ Kühlaggregat. Deutlich zu erkennen der Kompressormotor und das Rohrsystem, welches durch einen Kühlkörper mit Lamellen zur besseren Wärmeableitung führt.



Abgebildet ist das Heizmodul, welches die Bildung von Kondenswasser vermeidet. Enorm wichtig ist hierbei, dass der komplette Sockel und der Prozessor mit Silikonwärmeleitpaste eingeschmiert werden, damit eine optimale Wärmeableitung gewährleistet ist.

Aufgrund seiner überragenden Kühlleistung ist VapoChill™ in der Lage Prozessoren bis zu einer Wärmeabgabe von 200 Watt bei unter 0°C zu halten. Ein vermehrter Einsatz dieser Technik auch in handelsüblichen Computern könnte die Kosten aufgrund höherer Nachfrage und somit größeren Produktionszahlen eventuell senken, sodass VapoChill™ künftig als Kühlleistung für die neuen Prozessorgenerationen benutzt werden kann, auch von Normalverbrauchern. Einziger Nachteil hierbei ist nur die recht aufwändige Installation, die von Laien nur mühsam zu bewältigen ist.

4. Ein Blick in die Zukunft der Prozessorentwicklung

Zukünftige Prozessorgenerationen werden noch sehr viel stärkere Anforderungen an Material und Technik stellen. Schon die kommende Prozessorgeneration, die bis zum Jahre 2007 bei 10 GHz angekommen sein soll laut Intel™s Forschern, wird die heutigen Kühllösungen und Materialien an ihre Grenzen bringen. Bis 2010 wird vermutlich ein Stillstand in der Prozessortechnik zustande kommen, sofern nicht bis dahin neue Lösungen für die Problematik der Elektromigration gefunden worden sind. Ein Gedanke wäre ein ‚Wegwerfprozessor‘, der nur kurze Zeit hält, was jedoch auf dem offenen Markt nicht sehr gut verkaufbar sein wird. Die meisten Firmen möchten nicht alle paar Monate die Prozessoren ihrer kompletten Rechner austauschen lassen, nur weil diese aufgrund ihrer Fertigungsweise nicht länger halten. Zudem wäre der Kostenaufwand enorm für gerade auch kleinere Firmen. Sicher ist, dass die besprochene Problematik einen großen Teil der Forschungsarbeiten für die Forschungsabteilungen großer Prozessorhersteller werden wird und über die Entwicklung neuer Prozessoren entscheiden wird.

Vorstellbar wären im Zusammenhang mit neuen Anforderungen an die Kühlsysteme auch die Entwicklung neuer Gehäuseformstandards, die eine bessere Entlüftung gewähren. Letzte Versuche Intel™s in dieser Richtung sind jedoch gescheitert und stießen auf nur mäßige Akzeptanz.

5. Danksagungen

Ich möchte an dieser Stelle den verschiedenen Forschungsteams für die allgemeine Bereitstellung ihrer Arbeitsergebnisse danken, sowie dem Team von OC Inside für die Ausführungen zum VapoChill™ System. Ebenso gehen Danksagungen an Tabea Mayerhofer und Sascha Müller für ihre Unterstützung in Form von Lesekorrekturen und Formulierungshilfen, sowie Ermunterung und Anregung zu neuen Ideen.

7. Referenzen

[1] OC Inside – Asetek VapoChill™ Premium Edition Gehäusestest Special
http://www.ocinside.de/go_d.html?html/results/VapoChill™_pe_d.html

[2] IFW Dresden – Versuche mit Aluminiumleiterbahnen zur Elektromigration
<http://www.ifw-dresden.de/ifs/31/gfa/em-life.htm>

[3] Tweak PC - Bericht über Elektromigration
<http://www.tweakpc.de/berichte/emig/emig.htm>

[4] Intel™ Research – High Performance Logic Technology and Reliability Challenges
http://www.irps.org/03-41st/Intel™_IRPS03_Bohr_Keynote.pdf

[5] Computer Simulation Laboratory - Electromigration
<http://www.csl.mete.metu.edu.tr/Electromigration/emig.htm>