

Universität Hamburg
Department of Informatics Scientific Computing
Seminar Green IT
Leitung: Prof. Dr. Thomas Ludwig / Timo Minartz
Wintersemester 2011 / 2012

Energiesparmechanismen des Prozessors (x64 Architektur)

Welche Möglichkeiten gibt es, den Stromverbrauch von x64 Prozessoren zu senken?

13.03.2012

Dennis Jürgensen
Grindelallee 7
20146 Hamburg
E-Mail: dennis-page@web.de

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
2. Advanced Configuration and Power Interface (ACPI).....	4
2.1 ACPI-Betriebszustände.....	5
2.1.1 C-States	5
2.1.2 P-States	8
2.1.2.1 Governor.....	9
3. Implementierung	9
3.1 AMD.....	9
3.2 Intel.....	10
4. Fazit.....	11
5. Quellen.....	11

1. Einleitung

Zu Beginn der 90er Jahre erhielten die ersten Mehrkernprozessoren in Superrechnern Einzug. Mitte 2005 folgte auch der Schritt in die Haushalte mit AMDs Athlon64 X2 Manchester. Dieser Schritt vom Einkernprozessor zum Mehrkernprozessor war maßgebend in der Entwicklung von Prozessoren. So kamen die Hersteller schnell an ihre Grenzen, bedingt durch Leckströme und damit verbundene Wärmeentwicklung bei hohen Taktraten. Die Leckströme entstehen dabei bei immer dünner werdenden Isolationsschichten des Gate-Dielektrikums, die ein Bestandteil des Gates darstellt [1]. Aufgrund dessen, dass ein Chip aus Transistoren besteht entscheidet das Gate, ob ein Transistor ein- oder ausgeschaltet ist. Intel beispielsweise verwendet für das Gate-Dielektrikum Siliziumdioxid, wobei es ihnen gelungen ist die Dicke der Isolationsschicht auf 1,2 Nanometer zu reduzieren. Jedoch birgt genau das auch den Nachteil, dass die elektrischen Leckströme zunehmen, da ein Teil der Ladung durch die Isolationsschicht fließt und nicht zu dem Gate, wo es eigentlich hinfließen sollte. Folglich entsteht mehr Abwärme und ein Anstieg des Stromverbrauchs ist zu verzeichnen. Angesichts der Tatsache, dass ein Chip aus mehreren Millionen Transistoren bestehen kann, kann es hierbei zu einem ernst zu nehmenden Problem kommen [2]. In der nachfolgenden Abbildung ist ein sogenannter Transistor dargestellt.

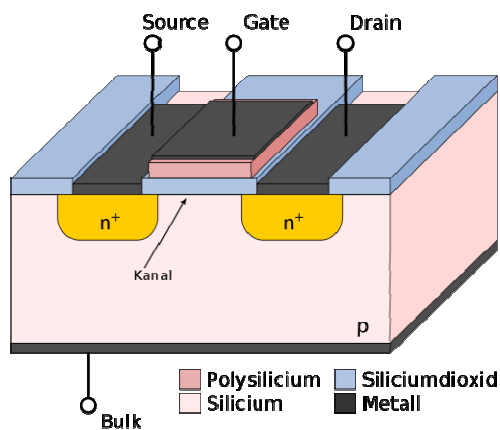


Abbildung 1: Aufbau eines Transistors

So ergab sich aus der Entwicklung der Mehrkernprozessoren ein großes Potential, da parallel mehrere Anwendungen besser ausgeführt werden können, oder sogar eine Anwendung mehrere Kerne beschäftigen kann um folglich effektiver zu arbeiten. Zurzeit ist die Verbreitung von paralleler Programmierung jedoch noch nicht sehr fortgeschritten, wie es sich die Prozessorhersteller AMD und Intel erhofft hatten. Dies hat mehrere Gründe, wie z.B. eine durchaus komplizierte Programmierung, das Aufkommen von neuen und ungewohnten Fehlerquellen, sowie die bislang noch nicht aufgekommene Notwendigkeit der Parallelisierung, da Anwendungen häufig auf Eingaben durch den Anwender warten müssen. Auch wenn diese Entwicklung nur schleppend voran geht, so ist ein wesentlicher Vorteil der ersten Dualcore-

Prozessoren, dass sie bedingt durch den geringeren Takt weniger Energieverbrauch pro Kern aufweisen und dadurch der Kühlaufwand minimiert wird [1]. Allerdings gilt es dieses Potential weiter auszuschöpfen, wenn man sich den Energieverbrauch der einzelnen Komponenten in einem Server näher anguckt.

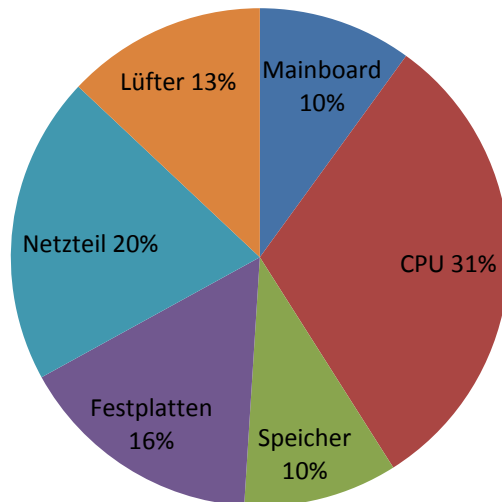


Abbildung 2: Verteilung des Energieverbrauchs in einem Server

So verbrauchen die CPU / der Prozessor und die Lüfter in einem Server knapp 45% der Energie. Dieser Anteil lässt sich dank einiger Energiesparmechanismen jedoch eindämmen, auf die in dieser Ausarbeitung näher eingegangen werden soll.

2. Advanced Configuration and Power Interface (ACPI)

Der Ende der 90er vorgestellte Industriestandard für die Energieverwaltung in Computersystemen wurde anfänglich von Intel, Microsoft und Toshiba entwickelt. Inzwischen haben sich zudem Hewlett-Packard und Phoenix Technologies angeschlossen. Doch nicht nur die Energieverwaltung gehört zu den Aufgaben von ACPI, sondern zusätzlich bietet es Schnittstellen für die Gerätekonfiguration und die Hardwareerkennung [3]. In der folgenden Ausarbeitung werden wir uns allerdings ausschließlich auf die Eigenschaften und Funktionen der Energieverwaltung beschränken, da lediglich diese ausschlaggebend für die Funktion der Energiesparmechanismen von x64 Prozessoren sind.

ACPI setzt sich aus drei betriebssystemunabhängigen Blöcken zusammen und stellt dem verwendeten Operating System (OS) mittels eines Treibers, der eine systemabhängige Komponente darstellt, eine Schnittstelle zwischen der Hardware und dem OS bereit. Zudem hat der ACPI-Treiber einen integrierten AML-Interpreter. AML ist eine plattformunabhängige Programmiersprache, mit Hilfe derer sich die

Funktionen des Boards steuern lassen. Die ACPI-Funktionseinheiten sind allerdings einzig und allein im OS integriert [4].

Die Treiber können, um die Funktionalitäten des ACPI nutzen zu können, sich an den ACPI-Registern bedienen, Routinen des ACPI-BIOS aktivieren, oder auch ACPI-Tabellen auslesen [4]. Das ACPI-BIOS dient hierbei zur Verwaltung der äußerst komplizierten ACPI-Tabellen und stellt die notwendigen Startsequenzen, sowie Interfaces für Restart-, Wake- und Sleep-Funktionen. Diese Modi werden demnach über den ACPI-BIOS aktiviert, oder auch deaktiviert [5].

Zentrale Bedeutung haben allerdings die ACPI-Tabellen. Diese beinhalten Informationen bezüglich des Mainboards und der angeschlossenen Komponenten. Zudem beinhalten sie Informationen bezüglich der unterschiedlichen Stromsparszustände [5,8].

2.1 ACPI-Betriebszustände

Die ACPI-Spezifikation definiert vier verschiedene Betriebszustände: Die des gesamten Systems(S-States), die des Prozessors(P-und C-States) und sonstiger Komponenten(D-States). Die Kennzeichnung setzt sich demnach aus den Buchstaben der Betriebszustände und einer Ziffer zusammen. Je höher die Ziffer der Zustände ist, desto sparsamer sind die Komponenten und desto mehr Zeit wird benötigt um den Normalzustand wiederherzustellen [6]. Die Prozessor Performance States (P-States) und Prozessor Operating States (C-States) beschreiben dabei die Fähigkeit des Prozessors zwischen verschiedenen unterstützten Frequenzen und Spannungen, je nach Auslastung des Prozessors, zu wechseln. Da diese ausschlaggebend sind für die Energiesparmechanismen des Prozessors werden diese im Folgenden näher erklärt.

2.1.1 C-States

Sollte sich der Prozessor, oder vereinzelte Kerne im Leerlauf befinden, so kann der Prozessor sich selbst in der Leistung drosseln und bei vorhandenen 4 Kernen beispielsweise 3 in einen Energiesparmodus versetzen und die anfallende Arbeit lediglich mit einem Kern verrichten. Je nach Dauer des Leerlaufs schaltet der Prozessor in immer tiefere Idle-Zustände. C0 beschreibt dabei einen Prozessor unter Last, bzw. Vollast bis hin zum C6, der einer vollkommenen Spannungsabschaltung nahe kommt. Je höher das C-State ist, desto mehr Prozessorkomponenten werden in ihrer Leistung gedrosselt und desto tiefer sind die Schlafzustände des Prozessors. Ein Nachteil tieferer Schlafzustände ist allerdings eine Verlängerung der Zeit, die ein Prozessor benötigt, um wieder unter Vollast arbeiten zu können. Im Folgenden befindet sich eine Tabelle über die neun vorhandenen C-States. Jedoch unterstützt

nicht jeder Prozessor alle neun C-States. Dies hängt von der Verwendung und des Alters eines Prozessors ab. Mobile Prozessoren haben in der Regel mehr C-States implementiert, da bei mobilen Geräten mehr Wert auf lange Akkulaufzeiten gelegt wird [7].

C-States	Funktion	Intel	AMD	Zeit zurück bis Volleistung	Leistungs-aufnahme
C0	Volleistung	ALLE	ALLE	-	10 bis 130 Watt
C1	Halt	Interner CPU Takt wird teilweise per Software angehalten	Interner CPU Takt wird teilweise per Software angehalten	~ 10ns	10 bis 30 Watt
C1E	Erweiterter Halt	Interner CPU Takt wird teilweise per Software angehalten und reduziert die CPU Spannung(VCore)	Interner CPU Takt wird komplett per Software angehalten	> 10 ns	Keine Angaben
C2	Stop	Interner CPU Takt wird per Hardware angehalten	Interner CPU Takt wird per Hardware angehalten	~ 100 ns	7 bis 15 Watt
C2E	Erweiterter Stop	Interner CPU Takt wird per Hardware angehalten und reduziert die CPU Spannung (VCore)	Nicht vorhanden	> 100 ns	Keine Angaben
C3	Schlaf / Tiefschlaf	Interner (Schlaf) bzw. Interner und externer (Tiefschlaf) CPU Takt wird komplett angehalten. Der Level 1 Cache wird geleert.	Interner (Schlaf) bzw. Interner und externer (Tiefschlaf) CPU Takt wird komplett angehalten. Teilweise mit Reduzierung der CPU Spannung (VCore)	~ 50 µs	Keine Angaben
C4	Tieferer Schlaf	Reduziert die CPU Spannung (VCore) deutlich. Der Level 1 und Level 2 Cache wird geleert.	Reduziert die CPU Spannung (VCore) deutlich. Der Level 1 und Level 2 Cache wird geleert.	~ 150 µs	5 bis 10 Watt
C4E / C5	Erweiterter Tieferer Schlaf	Reduziert die CPU Spannung (VCore) noch weiter und schaltet den Cache aus	Nicht vorhanden	~ 250 µs	Keine Angaben

C6	Spannungs- abschaltung	Reduziert die CPU Spannung (VCore) auf Werte nahe 0 Volt	Nicht vorhanden	> 250 μ s	Keine Angaben
----	---------------------------	---	-----------------	---------------	------------------

Tabelle 1: Übersicht der C-States, ihrer Veränderung auf das System und die Leistungsaufnahmeveränderung

Auffallend in der Tabelle sind die Unterscheidung zwischen internem und externem CPU Takt und der Level 1 und 2 Cache. Zur Verdeutlichung sollen diese Begrifflichkeiten im Folgenden kurz erläutert werden:

Interner CPU-Takt:

Der interne CPU-Takt wird in Megahertz (MHz) angegeben und beschreibt wie viele Befehle eine CPU pro Sekunde verarbeiten kann [10].

Externer CPU-Takt:

Als externer CPU-Takt wird derjenige Takt verstanden, den die CPU und der First-Level-Cache von dem Motherboard bekommen [10].

Level 1 Cache / First-Level-Cache:

Der Level 1 Cache ist ein schneller Zwischenspeicher, der im Prozessor integriert ist und zusammen mit dem internen CPU-Takt arbeitet. Dieser enthält die am häufigsten verwendeten Daten und Befehle des RAMs. Sollte die CPU Daten/Befehle aus dem RAM benötigen, so wird blitzschnell überprüft, ob diese bereits im Level 1 Cache vorhanden sind und könnten somit noch im selben Takt verarbeitet werden, sollte dies der Fall sein. Der Level 1 Cache befindet sich in der Regel in der CPU selber und hat eine gängige Größe zwischen 4 und 256kByte. Denkbar wäre eine Vergrößerung des Caches um mehr Daten schneller verfügbar zu machen, jedoch würden die verwendeten Suchalgorithmen zu lange benötigen um die Daten zu finden und somit wieder ineffizient arbeiten [11, 12, 13].

Level 2 Cache / Second-Level-Cache:

Der Level 2 Cache befindet sich in der Regel ebenfalls in der CPU und hat eine Größe zwischen 64Kilobyte und mehreren Megabyte. Dieser übernimmt ebenfalls die Funktion eines schnellen Zwischenspeichers, ähnlich des Level 1 Caches. Verglichen mit dem Level 1 Cache sind die Zugriffe auf den Level 2 Cache jedoch deutlich langsamer mit 10ns Zugriffszeit, aber dennoch deutlich schneller als wenn die CPU die Daten/Befehle aus dem Arbeitsspeicher anfordert, der mit 60-80ns doch sehr langsam ist [11, 12, 13].

2.1.2 P-States

Die Advanced Configuration and Power Interface Spezifikation definiert die P-States als Power Management States. Die Anzahl der unterstützten P-States ist dabei allerdings abhängig vom Alter und der Art der Verwendung des Prozessors. Sollten diese anhand der Systemauslastung richtig konfiguriert sein, so lassen sich effektiv Stromersparnisse erzeugen. Dies geschieht durch Herabsetzen der Frequenz in Verbindung mit einem Senken der Prozessorspannung. Dies geschieht jedoch nicht beliebig, sondern nutzt technisch bedingte feste Punkte des Prozessors. Das Entstehen dieser Punkte ist einfach zu erklären [9].

Da sich die Frequenz aus dem Front-Side-Bus (FSB) eines Prozessors und einem Multiplikator zusammensetzt, bleibt bei festem FSB und einem Multiplikator, der sich bei Intel nur aus einer ganzen Zahl zusammensetzt kein Spielraum für beliebige Punkte. AMD hingegen lässt teilweise zwar auch halbe, oder viertel Multiplikator zu, aber beschränkt den Spielraum abermals [16].

Hierzu ein Beispiel aus dem Deutschen Klimarechenzentrum (DKRZ) anhand der dort verwendeten Hardware:

Das DKRZ verwendet in ihren Clustern zwei unterschiedliche Prozessoren. Zum einen kommt ein Intel Xeon X5560 zum Einsatz, der folgende Frequenzen hat:

2,801GHz; 2,8GHz; 2,667GHz; 2,533GHz; 2,4GHz; 2,267GHz; 2,133GHz; 2GHz; 1,867GHz; 1,733GHz; 1,6GHz

Exemplarisch die Berechnung des Punktes 2,667GHz. Der Xeon X5560 hat einen FSB von 333MHz und multipliziert mit einem Multiplikator von 8 erhält man ca. 2,667GHz.

Desweiteren wird ein AMD Opteron 6168 verwendet mit einem FSB von 200MHz. Angesichts dessen, dass AMD auch halbe und viertel Multiplikatoren zulässt ergeben sich folglich folgende feste Punkte für den Opteron 6168:

1,9GHz; 1,5GHz; 1,3GHz; 1GHz; 800MHz

Desto höher die Nummer hinter dem P-State ist, desto langsamer arbeitet folglich der Prozessor, da die Frequenz unmittelbaren Einfluss auf die Geschwindigkeit eines Prozessors hat. Jedoch ist es dem Prozessor nur möglich zwischen verschiedenen P-States zu wechseln, wenn sich dieser im C-State C0 befindet. Die Entscheidung wie tief ein P-State gewählt wird liegt hierbei beim Betriebssystem. Dabei wird berücksichtigt, dass eine Rückkehr zum Normalbetrieb (P0) nicht unangemessen lange dauern sollte [3]. Es macht allerdings nicht immer Sinn den Prozessor direkt in den P0 zu schalten, wenn Last auf diese zukommt. So braucht der Prozessor zwar doppelt so lange für das Ausführen von Befehlen bei halber Frequenz, jedoch fällt die Abwärme geringer aus, was zur Folge hat, dass die Lüfter ihre Drehzahl senken können um die Wärme abführen zu können und folglich Strom beim Betreiben des Lüfters gespart werden kann. Außerdem bedeutet die Halbierung der Frequenz nicht einhergehend die Halbierung der Spannung. So benötigt ein Prozessor unter Vollast

fiktiv 40 Watt und unter halber Last 30 Watt. So ist leicht ersichtlich, dass die Verdopplung der Rechenzeit durch Halbierung der Frequenz nicht automatisch zu einem Einsparpotential führen muss [15]. Zudem ist zu erwähnen, dass das Senken der Frequenz und Spannung die Lebensdauer eines Prozessors um ein Vielfaches erhöht.

2.1.2.1 Governor

Unter Linux, wie auch Windows gibt es sogenannte Governor, die das Wechseln zwischen verschiedenen P-States beeinflussen, oder auch festlegen. In Linux sind standartmäßig drei verschiedene Governor zu nennen.

Einer davon ist der Performance Governor. Dieser legt die Frequenz durchgehend auf das erlaubte Frequenzmaximum fest. Eine Stromersparnis in diesem Governor ist somit im Hinblick auf P-States ausgeschlossen.

Im Gegenzug gibt es den Powersave Governor, der genau das Gegenteil von dem Performance Governor darstellt. Hierbei taktet der Prozessor auf seinem erlaubten Minimum der Taktfrequenz. Doch auch dieser Governor verspricht nicht das höchste Einsparpotential. Dies lässt sich damit erklären, dass ein Prozessor unter Vollast für eine Berechnung weniger Zeit benötigt, hierbei zwar mit maximaler Kernspannung und Frequenz arbeitet, aber es dem Prozessor schneller ermöglicht diesen wieder in einen tieferen C-State fallen zu lassen, die mehr Einsparpotential bergen als ein Power Management Zustand (P-State). Hinzu kommt die Verdeutlichung aus dem letzten Absatz von Kapitel 2.1.2.

Desweiteren stellt Linux den zu empfehlenden Governor Ondemand zur Verfügung. Hierbei werden die Frequenzen und zum Teil Spannungen den Anforderungen an den Prozessor angepasst. Dabei kann es vorkommen, dass die Frequenz sprunghaft angehoben, oder gesenkt wird. Aufgrund der durchgehend ausreichend zur Verfügung stehenden Rechenleistung birgt dieser Governor das größte Einsparpotential und ist daher bei herkömmlicher Konfiguration standartmäßig eingestellt [17].

Unter den Energieoptionen von Windows verbergen sich diese Governor lediglich mit anderem Namen. So heißen die Governor hier Höchstleistung, Energiesparmodus oder Ausbalanciert, die mit denen von Linux vergleichbar sind.

3. Implementierung

3.1 AMD

Die Implementierung der P-States nennt sich bei AMD Cool'n Quiet und wurde mit der Einführung der Athlon 64-Prozessoren im Jahre 2003 auf den Desktop, sowie Server Prozessoren eingeführt. Neu war diese Technologie allerdings mit der

Einführung von Cool'n Quiet nicht. So entstand aus dem bereits bestehenden PowerNow! in einer verbesserten Version Cool'n Quiet, die zuvor nur Einzug in die mobilen Prozessoren erhalten hatte. Zur Aufgabe von Cool'n Quiet gehört der beschriebene Prozess unter 2.1.2. Somit ist sie für die Anpassung der Spannung und des Taktes des Prozessors verantwortlich. Der Takt kann dabei auf bis zu 800MHz oder 1000MHz gesenkt werden. Dies geschieht je nach Art und Verwendung des Prozessors in bis zu 32 Stufen. Durch Cool'n Quiet lassen sich folglich nicht nur energieeffizientere, sondern auch nahezu geräuschlose Systeme zusammenstellen, die deutlich mehr Möglichkeiten für die Zusammenstellung von Hardwarelösungen bieten [18, 19].

So wurde AMD im Jahre 2005 mit dem Energy Star von der amerikanischen Umweltschutzbehörde (EPA) für Umwelt schonendes, Kosten und Energie sparendes produzieren ausgezeichnet [18].

3.2 Intel

Das Pendant zu AMDs Cool'n Quiet nennt sich Intel-SpeedStep-Technologie oder häufig auch nur kurz SpeedStep. Intel entwickelte diese Technologie ursprünglich, um die Akkulaufzeit und die Mobilität von Notebooks zu erhöhen [20]. Von den Aufgaben und grundlegenden Funktionsweisen ändert sich jedoch nichts im Vergleich zum Cool'n Quiet von AMD. Jedoch takten Intels Prozessoren auf der niedrigsten Stufe standartmäßig nicht so gering, wie der Vergleich von Intels Xeon X5560 (1,6GHz) und AMDs Opteron 6168 (800MHz) des DKRZ zeigt. Einzig wirklich nennenswerter Unterschied ist die Möglichkeit des Cool'n Quiet einzelne Kerne steuern zu können, was bei Intels SpeedStep bei dem genannten Prozessor nur pro Sockel möglich ist und somit ein gewisser Grad Effizienz verloren geht.

Ein Sockel wird in einem System dazu verwendet um einen Prozessor, der mehrere Kerne beinhalten kann, auf eine Hauptplatine stecken und gegebenenfalls austauschen zu können. Dies verdeutlicht die nachfolgende Abbildung:

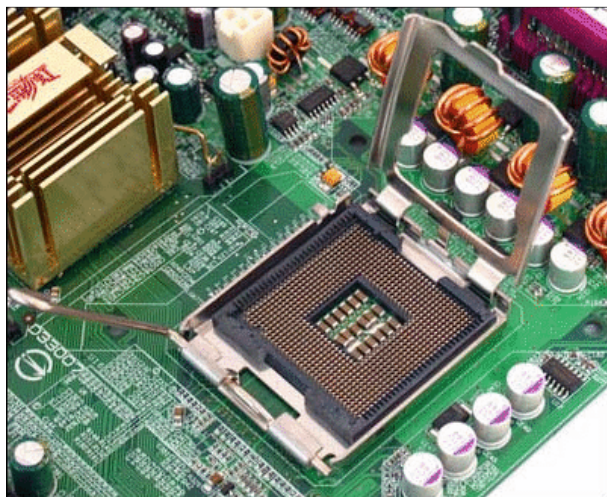


Abbildung 3: Prozessorsocket

Somit kann das Betriebssystem bei AMDs Opteron 6168 einzelne Kerne in tiefe C-States schalten, wohingegen Intels Xeon X5560 Kerne nur komplett schlafen gelegt werden können, bzw. im C0 nur die kompletten Kerne mittels des genannten SpeedStep in die verschiedenen P-States versetzt werden können. SpeedStep übernimmt dabei lediglich die Steuerung der P-States und hat keinen Einfluss auf die C-States des ACPI.

4. Fazit

Angesichts der Tatsache, dass zunehmend Strom in Deutschland konsumiert wird kann jede noch so geringe Einsparmöglichkeit einen Beitrag zu einer grüneren Welt leisten. Allerdings sind die Energiesparmaßnahmen des Prozessors wesentlich von den Einstellungen des Betriebssystems, dessen Anwendungen und dem Nutzer abhängig. So springt beispielsweise die Windows Suchfunktion, oder der Virenschoner an, wenn die Auslastung des Prozessors gering ist und unterbinden damit tiefere Schlafzustände (C-States). Zudem gibt es aber auch irreführende Funktionen in Betriebssystemen, wie zum Beispiel den Bildschirmschoner. Dieser suggeriert dem Nutzer eine einfache Sparmaßnahme, die letztendlich keine ist. Denn auch dieses Feature spricht den Prozessor an [7].

Die Prozessorhersteller nutzen diese Energiesparmechanismen zudem gerne für Werbezwecke, um dem Käufer ein gutes Kaufgefühl zu geben und den aufkommenden Trend der Green IT zu unterstützen. Jedoch verbrauchen die Hersteller bei der Produktion von Prozessoren schon so viel Strom, wie er während seines Betriebes nicht mal annähernd einsparen könnte. In Summe dessen sind diese Mechanismen ein guter Ansatz, aber es bedarf eines geschulten und wissenden Anwenders diese Mechanismen auch sinnvoll einzusetzen und der Wille der Unternehmen ihre Verfahren zur Herstellung von Prozessoren weiter zu verbessern und grüner zu gestalten [7,22].

5. Quellen

Abbildung 1:

[http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:N-Kanal-MOSFET_\(Schema\).svg&filetimestamp=20100112102951](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:N-Kanal-MOSFET_(Schema).svg&filetimestamp=20100112102951)

Abbildung 2:

In Anlehnung an:

http://winfwiki.wi-fom.de/index.php/Bild:Energieverbrauch_Server.jpg

Abbildung 3:

<http://www.itwissen.info/bilder/sockel-775-mit-aufgeklapptem-andruckrahmen.png>

Tabelle 1:

[6] <http://www.elektronik-kompodium.de/sites/com/1309151.htm>

[7] <http://www.comptech-info.de/component/content/article/46-computer-infos/418-c-states-was-sind-das>

Restliche Quellen:

[1] <http://www.elektronik-kompodium.de/sites/com/1203171.htm>

[2] <http://www.elektronik-kompodium.de/sites/com/0404281.htm>

[3] http://de.wikipedia.org/wiki/Advanced_Configuration_and_Power_Interface

[4] http://www.tecchannel.de/pc_mobile/komponenten/402439/grundlagen_energiem_anagement_mit_acpi_30/index4.html

[5] http://www.tecchannel.de/pc_mobile/komponenten/402439/grundlagen_energiem_anagement_mit_acpi_30/index5.html

[8] <http://www.inf.hs-zigr.de/~boehm/rt991/grauert/ACPI.htm>

[9] <http://publib.boulder.ibm.com/infocenter/lnxinfo/v3r0m0/topic/liaai/cpufreq/CPUPerformanceStates.htm>

[10] http://www.bytes-and-more.de/tech/glossar_prozessoren.htm

[11] <http://www.pc-erfahrung.de/hardware/prozessor/cpu-prozessortakt.html>

[12] http://de.wikibooks.org/wiki/Computerhardware:_Prozessor:_Cache

[13] <http://www.macinfo.de/hardware/l2onboard.html>

[14] <http://wiki.ubuntuusers.de/Prozessortaktung>

[15] <http://linuxundich.de/de/ubuntu/powersave-heist-nicht-energie-sparen/>

[16] <http://www.planet3dnw.de/vbulletin/blog.php?b=28>

[17] <http://publib.boulder.ibm.com/infocenter/lnxinfo/v3r0m0/index.jsp?topic=%2Fliaai%2Fcufreq%2FCPUPerformanceStates.htm>

[18] <http://de.wikipedia.org/wiki/Cool%E2%80%99n%E2%80%99Quiet>

[19] <http://www.computerbase.de/artikel/prozessoren/2004/anleitung-athlon-64-mit-cool-n-quiet/>

[20] <http://de.wikipedia.org/wiki/Intel-SpeedStep-Technologie>

[21] <http://www.amd.com/us/products/technologies/cool-n-quiet/Pages/cool-n-quiet.aspx>

[22] <http://www.utopia.de/ratgeber/green-it-mein-oeorrechter-rechner-zur-cebit-neue-pcs-computer-apple-fijitsu?all>