

2 Kühlung

2.1 WARUM IST KÜHLUNG SO WICHTIG?

Ein einfacher PC kommt mit durchschnittlich 100 W aus, ein leistungsfähiger PC braucht 300 bis 500 Watt. Ein Hochleistungs-PC kann mehr als 1000 Watt benötigen. Ein Notebook-Netzteil liefert 80 bis 90 Watt, wovon etwa 25 Watt für den Betrieb gebraucht werden, die restliche Leistung wird für das schnelle Aufladen des Akkus verwendet. Diese elektrische Leistung wird fast vollständig in Wärme verwandelt.

Hochwertige Kühlung ist wichtig für die Lebensdauer.

Wie wichtig die Kühlung ist, sieht man an den Methoden, die Lebensdauer von Komponenten vorherzusagen.

Wie wird die Lebensdauer einer Computerkomponente ermittelt? Bei nichtmetallischen Stoffen rechnet man mit der Faustformel, dass eine Temperaturerhöhung pro 10 °C die Lebensdauer halbiert. Eine Erhöhung um weitere 10 °C halbiert die Lebensdauer noch einmal. Eine um 50 °C erhöhte Temperatur verringert die Lebensdauer um einen Faktor von $2^5 = 32$. Wenn die Industrie für ein Erzeugnis die Lebensdauer vorherzusagen will, werden die Testobjekte bei einer drastisch erhöhten Temperatur getestet. Innerhalb einiger Wochen altern die Testobjekte so stark wie bei normalen Temperaturen in Jahrzehnten. Aus der Anzahl der ausgefallenen Testobjekte wird eine durchschnittliche Lebensdauer errechnet. Auch wenn sich die Praxis nicht immer genau an die Theorie hält, sollte Ihnen doch klar werden, wie wichtig eine gute Kühlung ist.

Bedenken Sie außerdem, dass Computerkomponenten nicht immer schlagartig ausfallen. Manchmal verschlechtern sich die Parameter allmählich, was zu einer allmählich steigenden Anzahl von Abstürzen führen kann. Beispielsweise verändern sich durch „Elektromigration“ die Leiterbahnen in der CPU, im RAM und in anderen Chips. In den Festplatten lässt das Magnetfeld der gespeicherten Bits nach. Selbst das Lötzinn altert, besonders das bleifreie. Eine allmählich steigende Zahl von Lese- und Übertragungsfehlern kann lange Zeit durch die automatischen Fehlerkorrekturmechanismen erfolgreich ausgeglichen werden, was den PC möglicherweise langsamer macht.

2.2 CPU-KÜHLER

Auf der Unterseite einer Intel-CPU müssen 1150 bis 2066 Kontakte untergebracht werden, bei einer AMD-CPU sind es bis zu 1331. Die große Anzahl der Kontakte und deren Mindestabstand erzwingen eine große Grundfläche der CPU, z. B. bei den Sockeln 1150 bis 1156 sind es $36 \text{ mm} \times 36 \text{ mm} = 1296 \text{ mm}^2$. Der Halbleiter im Inneren des Prozessorgehäuses hat eine viel kleinere Fläche, bei der riesigen 10-Kern-CPU i7-6950X sind es $17,6 \text{ mm} \times 20,2 \text{ mm} = 356 \text{ mm}^2$. Um die Hitze möglichst gleichmäßig auf die gesamte Oberfläche zu verteilen, setzt der CPU-Hersteller einen **Heatspreader** als Deckel auf den Chip. Dieser „Hitzeverteiler“ ist eine kleine Metallplatte, oft aus nickelbeschichtetem Kupfer, mit dem die Hitze des Chips auf die gesamte Fläche des CPU-Deckels verteilt wird, um sie von dort zum Kühlkörper ableiten zu können.

Wenn Sie das Datenblatt des CPU-Herstellers betrachten, finden Sie einige Werte aufgeführt, die für die Planung der Kühlung wichtig sind:

- **TDP = Thermal Design Power:** Vom Hersteller angegebene maximale Leistungsaufnahme einer CPU oder anderer elektronischer Bauteile. Bei Intel-CPU's ist TDP maximal 140, die Achtkern-CPU's von AMD setzen bis zu 220 W um. Mit der TDP werden Kühlung und Strombedarf geplant.
- $T_{\text{junction}} = T_{\text{core}}$: die Temperatur der einzelnen Kerne in der CPU. Diese wird von den CPU-internen Temperatursensoren gemessen und kann von der Elektronik der Hauptplatine sowie von Programmen für jeden Kern einzeln abgefragt werden.
- $T_{\text{junction Max}}$: die vom CPU-Hersteller festgelegte Maximaltemperatur. Bei Intel-CPU's liegt diese bei etwa 100 °C. Wenn sich die Temperatur diesem Wert nähert, beginnt die CPU sicherheitshalber zu „throteln“. Als „Throttling“ wird das Auslassen von Takten bezeichnet, um die Temperatur zu senken

und die CPU zu schützen. Ein Throttling von 75 % bedeutet, dass die CPU drei von vier Takten auslässt. Wird die Temperatur trotzdem noch überschritten, schaltet sich die CPU vollständig ab.

- T_{case} = Zulässige Oberflächentemperatur der CPU in der Mitte des Heatspreaders. Diese liegt bei Intel-CPU's meist zwischen 65 und 75 °C.
- T_{die} = interne CPU-Temperatur. T_{junktion} misst nur die Core-Temperatur(en), während in T_{die} auch die Wärmeentwicklung anderer CPU-Bereiche (z. B. vom Cache) mit eingeht.

Wenn der Hersteller eines CPU-Kühlers „200 W TDP“ im Datenblatt angibt, kann dieser Kühler bis zu 200 Watt CPU-Leistung abführen (und läuft dabei mit voller Drehzahl). Wenn die CPU „nur“ TDP = 140 W hat, kann der Kühler mit reduzierter Leistung laufen und ist dadurch leiser. Übrigens sind die TDP-Werte von CPUs meist reichlich bemessen. Das sieht man daran, dass für mehrere CPUs der gleichen Familie der gleiche TDP-Wert angegeben wird, obwohl sie mit verschiedenen Frequenzen getaktet werden (und deshalb unterschiedlich heiß werden).

Die CPU-Hersteller haben mehrere Vorsichtsmaßnahmen getroffen, um den Hitzetod der CPU zu vermeiden. Bei Intel lässt ein „Thermal Monitor“ einzelne CPU-Takte ausfallen, wenn die CPU kurzzeitig zu heiß wird. Bei mangelhafter Kühlung könnte eine „übermäßige Ansteuerung des Thermal Control Circuit zu einem merklichen Leistungsabfall führen“ (Core 2 Duo processor datasheet). Wenn die Temperatur nicht sinkt, senkt der „Thermal Monitor 2“ den Takt auf die niedrigste mögliche Einstellung. Ein Signal „Prozessor Heiss“ (PROCHOT) meldet den Zustand an die Software. Auch bei einer Überhitzung anderer Systemkomponenten kann die CPU gebremst werden, damit der PC abkühlen kann. Mehr dazu können Sie lesen unter <http://www.tomshardware.de/CPU-Kuhler-uberhitzung,testberichte-239862-3.html>

2.3 MATERIALIEN FÜR KÜHLER

Einfache Kühler bestehen aus einem Aluminiumblock. Kühlrippen werden hineingefräst oder entstehen durch Strangpressen. Die Luft erwärmt sich an den Rippen und steigt auf, kühlere Luft strömt nach. Ein solcher „passiver Kühler“ wird oft für die Kühlung des Chipsatzes und für einfache Grafikkarten verwendet.

Für die CPU und für leistungsfähige Grafikkarten reicht ein passiver Kühler nicht aus. Wenn ein Ventilator die Luft bewegt, nennt man das eine „aktive Kühlung“. Durch die Luftströmung verbessert sich die Kühlwirkung um ein Vielfaches. Allerdings erkaufte man den Vorteil mit Lüftergeräusch und mit schneller Verschmutzung der Kühlrippen.

Material	Leitfähigkeit	Dichte	Preis/kg	Preis
Blei	35 λ	11,3 g/cm ³	1 €	0,55 €
Aluminium	221 λ	2,7 g/cm ³	2 €	0,25 €
Kupfer	370 λ	8,9 g/cm ³	5 €	2,25 €
Silber	429 λ	10,5 g/cm ³	300 €	160 €
Nanoröhrchen aus Kohlenstoff	6000 λ	1,4 g/cm ³	6000 €	420 €

Tab. 2.1: Vergleich Wärmeleitfähigkeit und Dichte diverser Materialien

Um die Kühlwirkung zu verbessern, kann man Kupfer verwenden, das eine 67 % bessere Wärmeleitfähigkeit hat als Aluminium. Silber, Diamant und Gold haben eine noch bessere Wärmeleitung, sind aber wegen des Preises ungebräuchlich.

Bei den Preisen in der letzten Spalte wurde davon ausgegangen, dass 50 cm³ Metall für den Kühlkörper benötigt werden.

Kupfer hat eine höhere Dichte und wiegt reichlich dreimal mehr als Aluminium. Wenn der Kühler aus purem Kupfer besteht, muss er sehr gut befestigt werden, damit er beim Transport nicht abreißt. Die aufwendigsten Kühler wiegen mehr als ein Kilogramm. Manche Hersteller verlangen, den Kühler vor jedem Transport auszubauen oder ihn mit Spannbändern im Gehäuse zu verzurren.

Ein Ausweg aus der Gewichtsmisere ist es, nicht den gesamten Kühlerblock aus Kupfer zu machen, sondern nur ein wenig Kupfer an der CPU anliegend zu verwenden. Das verbessert die Kühlung gegenüber reinem Aluminium deutlich und erhöht das Gewicht nur wenig.

2.4 WÄRMELEITPASTE

Die scheinbar glatten Oberflächen von Kühlkörper und Prozessor enthalten durch die mechanische Bearbeitung mikroskopische Rillen, „Hügel“ und „Täler“. Wo sich die metallischen „Hügel“ von CPU und Kühler direkt berühren, wird die beste Wärmeableitung erreicht. Wo Luft dazwischen ist, findet fast keine Wärmeübertragung statt. Deshalb werden die verbleibenden Lufträume mit Wärmeleitpaste gefüllt, die eine viel bessere Wärmeleitfähigkeit hat als Luft, allerdings nicht so gut leitet wie Metall. Sie sollten sehr, sehr sparsam mit der Paste umgehen: Sie soll nur winzige Luftspalten füllen, aber keinesfalls den direkten Metallkontakt zwischen CPU und Kühlkörper verhindern.

Wenn Sie eine neue CPU kaufen wollen, fragen Sie nach einer „Boxed“ Version, die zusätzlich zur CPU einen mit Wärmeleitpaste beschichteten Kühler enthält. Der Preisunterschied ist viel geringer als es der Kauf eines separaten Kühlers wäre. Solange Sie auf Übertaktungsexperimente verzichten und den PC bei mitteleuropäischen Temperaturen betreiben, reicht ein solcher Boxed-Kühler aus.

Einen besseren Kühler als den Boxed-Kühler sollten Sie verwenden,

- wenn Sie Ihren High-End-Computer intensiv nutzen, beispielsweise für mehrstündige Spiele,
- wenn Sie einen besonders leisen Lüfter wünschen.

Aber selbst mit dem besten Kühler kann es nach ein bis zwei Jahren passieren, dass die CPU zu heiß wird. Vermutlich müssen Sie nur die Wärmeleitpaste erneuern, um die frühere Kühlleistung zurückzuerhalten. Manche Wärmeleitpasten beginnen schon nach einem halben Jahr allmählich hart zu werden, wodurch sich die Kühlung verschlechtert. Häufige Erschütterungen bei Transporten können zwischen erhärteter Wärmeleitpaste und CPU einen Luftspalt verursachen, was die Kühlung drastisch verschlechtert. Eine Tube Wärmeleitpaste kostet nur etwa fünf Euro.

Kaufempfehlung Wärmeleitpaste

Der Preis sagt wenig über die Qualität aus. Die teuerste Paste kann unter den Schlusslichtern sein und umgekehrt. Die mit „silberhaltig“ angepriesenen Pasten (tatsächlich ist nicht Silber, sondern eine winzige Menge Silberoxid enthalten) sind kaum besser als silberlose. Im Test betragen die Unterschiede zwischen den besten und schlechtesten Pasten etwa 2 °C im Leerlauf, 4 °C bei mittlerer Last und 5 °C bei hoher CPU-Last – kaum der Rede wert. Wichtiger für die Effektivität der Kühlung ist es, die Paste **dünn** und **gleichmäßig** aufzutragen.

Als Lösungsmittel werden meist Glycerin oder Silikon verwendet. Die thermischen Eigenschaften sind ähnlich, aber Silicon verdunstet langsamer und ergibt eine etwas längere Lebensdauer. Manche Hersteller geben als Lebensdauer ihrer Paste fünf oder sogar acht Jahre an.

2.5 ALTERNATIVEN ZUR WÄRMELEITPASTE

2.5.1 Blei

Gelegentlich werden Kühler verkauft, deren Kontaktfläche mit weichem Blei beschichtet ist. Durch den Anpressdruck und die Wärme füllt das Blei die Rillen und Unebenheiten aus, allerdings nicht bis in die Tiefe der Rillen. Vorteil: Blei altert nicht wie Wärmeleitpaste, allerdings bleibt die Wärmeleitung hinter einer Wärmeleitpaste zurück.

2.5.2 Wärmeleitpad

Das ist eine Alternative zur Wärmeleitpaste. Meist ist es selbstklebend, man muss nur auf einer oder beiden Seiten eine Schutzfolie abziehen. Wärmeleitpads werden vorzugsweise für die Kühlkörper von Spannungswandlern und RAM-Chips genutzt.

2.5.3 Wärmeleitpad aus Liquid Metal

Hier wird sogenanntes „flüssiges Metall“ verwendet. Bei Zimmertemperatur ist das Metall fest, bei der Arbeitstemperatur der CPU wird das Metall weich. Je nach Zusammensetzung wird es bei einer Temperatur zwischen 70 und 85 °C (halb-)flüssig. Damit es die volle Wirkung erreicht, muss es einmalig so hoch erhitzt werden, dass es oberflächlich flüssig wird und die Unebenheiten der CPU- und Kühleroberfläche ausfüllt. Das nennt man den „Burn-In“ Prozess.

Wie macht man das? Man installiert ein Hilfsprogramm, welches die CPU-Temperatur überwacht, während Windows läuft. Dann wird der CPU-Lüfter stillgelegt (Stecker ziehen oder den Lüfter mit einem Pappstreifen bis zum Stillstand bremsen). Eine Anwendung wird gestartet, welche die CPU voll auslastet, und man lässt sie laufen, bis das Hilfsprogramm meldet, die vorgeschriebene Burn-In-Temperatur sei erreicht.

Wenn Windows noch nicht installiert ist, wie ermittelt man dann den richtigen Moment? Überwachen Sie bei stillgelegtem CPU-Lüfter die Temperatur im BIOS. In dem Moment, wenn das Metall flüssig wird und die Unebenheiten beginnt auszufüllen, verbessert sich die Kühlung schlagartig und die Kurve der CPU-Temperatur macht einen Knick nach unten.

Das Erreichen einer höheren Burn-In-Temperatur kann ein Problem sein. Wenn die CPU bei $T_{\text{case}} = 65 \text{ °C}$ zum Selbstschutz beginnt zu throtteln (die Taktfrequenz heruntersetzt), kann die notwendige Temperatur nur mit einem Fön erreicht werden. Dabei sollte man gut aufpassen, die CPU nicht zu überhitzen. Also vor dem Kauf eines Liquid-Metall-Pads dessen Burn-In-Temperatur mit dem Datenblatt der CPU vergleichen!

Ein weiteres Problem: Die Fachzeitschrift *c't* meint, der Burn-In-Prozess müsse von Zeit zu Zeit wiederholt werden. Ich kann mir das so nicht vorstellen.

Das Flüssigmetall darf nicht mit Alu-Kühlern in Berührung kommen, weil sonst das Aluminium korrodiert. Flüssigmetall-Wärmeleitpads sind besser und langlebiger als Paste, aber mit 10 Euro etwas teurer.

2.5.4 Peltier-Element

Ein Kühlkörper kann nicht kühler werden als die Raumtemperatur, und die kann im Sommer recht hoch sein. Ein Peltier-Element kann das ändern. Ein Peltier-Element besteht aus zwei Metallplatten, zwischen denen sich Halbleiter befinden. Wenn ein Gleichstrom hindurchfließt, kommt es zum Wärmetransport von einer Metallplatte zur anderen. Der Platte, die an der CPU anliegt, wird die Wärme entzogen und diese an die andere Platte abgegeben, die am Kühlkörper anliegt. Wenn zu viel Leistung in das Peltier-Element hineingepumpt wird, kann die kalte Seite Minustemperaturen erreichen. Eis und Kondenswasser müssen natürlich vermieden werden, deshalb wird der Strom durch das Peltier-Element temperaturabhängig geregelt.

Die heiße Seite wird sehr heiß, denn dort muss die Leistung der CPU plus die Leistung des Peltier-Elements abgeführt werden. Da wird ein extra großer Kühlkörper gebraucht.

Peltier-Kühler sind extrem leistungsfähig, allerdings ist der Strombedarf recht hoch. Mehrere Erfahrungsberichte weisen darauf hin, dass ein 50 Watt Element nicht ausreicht, um eine 100 Watt CPU zu kühlen. Ein Element vom Typ „TEC1 12714“ (max. 14 A bei 15 Volt, Kühlleistung 118 Watt, 50 Euro) würde für eine 140 Watt CPU ausreichen, sogar wenn sie übertaktet wird. Doch beachten Sie:

- Die höchste Spannung, die ein PC-Netzteil liefern kann, beträgt 12 Volt. Für die 15 Volt braucht man ein Extra-Netzteil.
- Die Gehäuselüfter müssen außer der CPU-Abwärme (die bis 140 Watt betragen kann) auch noch die vom Peltier-Element erzeugten zusätzlichen $14 \text{ A} \times 15 \text{ V} = 210 \text{ Watt}$ Wärmeleistung abführen.