

KEEP COOL

Wenn Rechner warm werden

Fredo Erxleben

Dresden, 3.7.2015

00 Motivation

Informatiker entwickeln nicht nur Programme, sondern auch die Maschinen auf denen die Programme laufen.

Diese Maschinen sollen energieeffizient sein und wenig Unterhalt kosten. (→ Wartung und Reparatur).

Dazu benötigt man Hilfe (unter Anderem) aus den Bereichen

- Elektrotechnik
- Thermodynamik
- Teilchenphysik
- Chemie
- Biologie (Überraschung!)

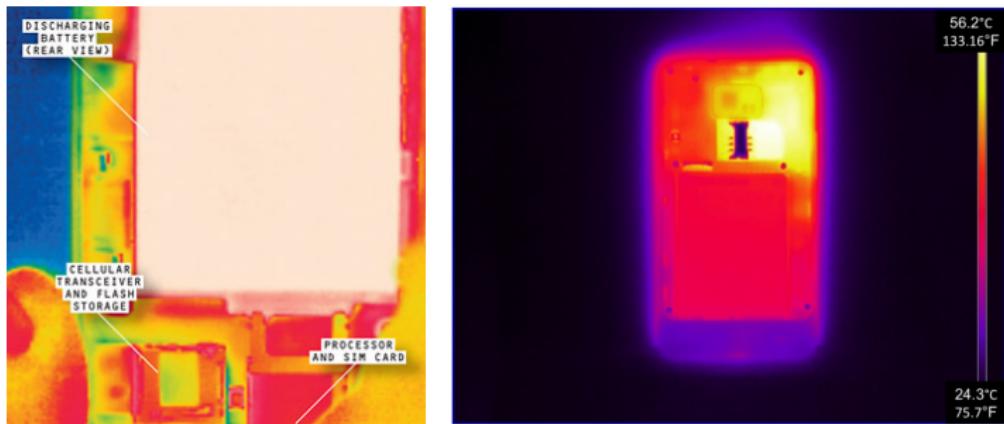
00 Inhalt

- 1 Was ist das Problem?
- 2 Ein paar Grundlagen
- 3 Warum wird es denn nun warm?
- 4 Wie schlimm ist es?
- 5 Was kann man dagegen machen?
- 6 Ist das alles?

01 Wo brennts denn?

- Prozessoren
- Grafikkarten
- Festplatten
- Netzteile
- WLan, Bluetooth, Mobilfunk...
- Netzwerkkarten

01 Beispiel: Mobiltelefone



01 Beispiel: Fahrzeuge

Bauteile in Motornähe sind Temperaturen $> 100^{\circ}\text{C}$ ausgesetzt.

Trotzdem müssen Steuer- und Bremselektronik zuverlässig funktionieren.

Problem hier:

Starke Wärmeeinwirkung von außen.

01 Beispiel: Raumfahrt

Die Sonneneinstrahlung in Erdnähe beträgt bereits $1300 \frac{W}{m^2}$.

Wärme kann im Weltraum nur durch Wärmestrahlung abgegeben werden.

Raumfahrzeuge stehen nur eine sehr begrenzte Energiemenge zur Verfügung.

02 Physik: Strom, Spannung und Temperatur

Elektrischer Strom ist die gerichtete Bewegung von freien Ladungsträgern (Elektronen).

Die **Temperatur** eines Leiters oder Halbleiters bestimmt die Menge dieser frei beweglichen Elektronen.

Die **Spannung** beeinflusst, wie schnell freie Elektronen unterwegs sind.

02 Physik: Elektrischer Widerstand

Jedes stromdurchflossene Bauelement hat einen **elektrischen Widerstand**.

An diesem wird elektrische Energie in thermische Energie umgesetzt.
→ Stromdurchflossene Bauteile werden warm.

Formel

$$\text{Widerstand} = \frac{\text{Spannung}}{\text{Stromstärke}}$$

02 Widerstand + Temperatur = ?

Die Temperatur beeinflusst auch den elektrischen Widerstand:

Wenn Temperatur ↑
Beispiel

Heißleiter
Widerstand ↓
Silizium

Kaltleiter
Widerstand ↑
Kupfer, Silber, Gold

Konsequenz:

Je wärmer ein Kaltleiter also bereits ist, desto schneller erwärmt er sich weiter.

02 Wie kommt Wärmeenergie von A nach B?

Wärmeenergie wird ...

- Wärmeleitung ... durch einen Körper transportiert
- Wärmestrahlung ... als Infrarotstrahlung abgegeben
- Wärmekonvektion ... durch Materialtransport abgeführt

02 Ein Wort zur Wärmeleitung

Die **Wärmeleitfähigkeit** gibt an ...

- ... wie viel Wärmeenergie ...
- ... bei gegebenem Temperaturunterschied ...
- ... und gegebenem Querschnitt ...
- ... über eine bestimmte Distanz ...
- ... durch einen Werkstoff transportiert werden kann.

Übrigens

Zusätzlich gibt es auch den so genannten **Wärmeübergang**.

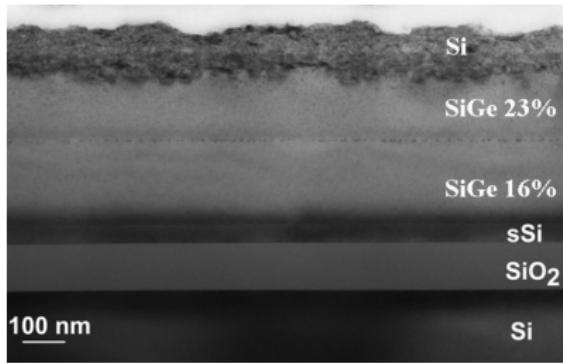
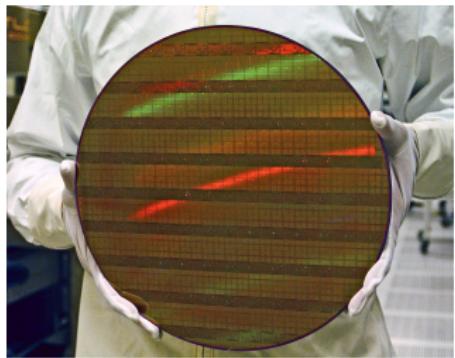
03 Einschub: Wie groß ist ein Nanometer?

Nehmen wir an, wir schrumpfen uns auf $\frac{1}{10.000.000}$...
... sind also nicht 180 cm sondern 180 nm groß ...

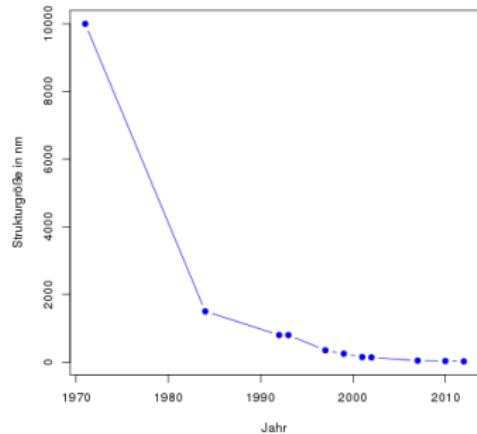
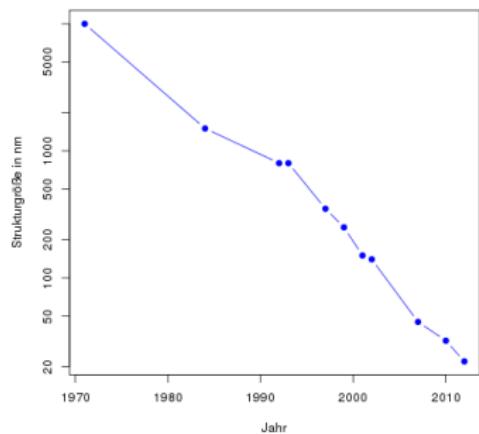
Dann wäre	...	so groß wie	...
	ein Stecknadelkopf		das Elbtal
	ein Staubkorn		die Innenstadt
	rotes Blutkörperchen		ein Fußballfeld
	ein Transistor		ein Blatt Papier

03 Einschub: Chips in Rohform

Chips bestehen aus Silizium-Kristallen, die gezielt verunreinigt werden.



03 Es wird eng



03 Das Moore'sche Gesetz

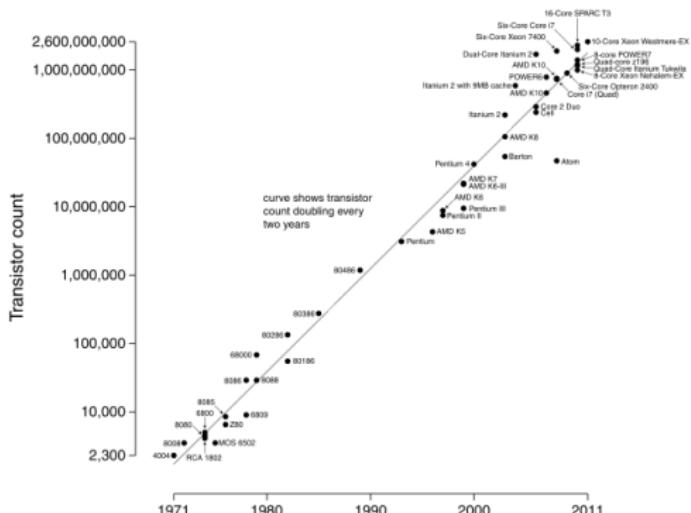
Daumenregel

Die Komplexität von Schaltkreisen verdoppelt sich alle 18 Monate.

Kann das immer so weiter gehen?

03 Tatsächlich!

Microprocessor Transistor Counts 1971-2011 & Moore's Law



03 Die Taktfrequenz

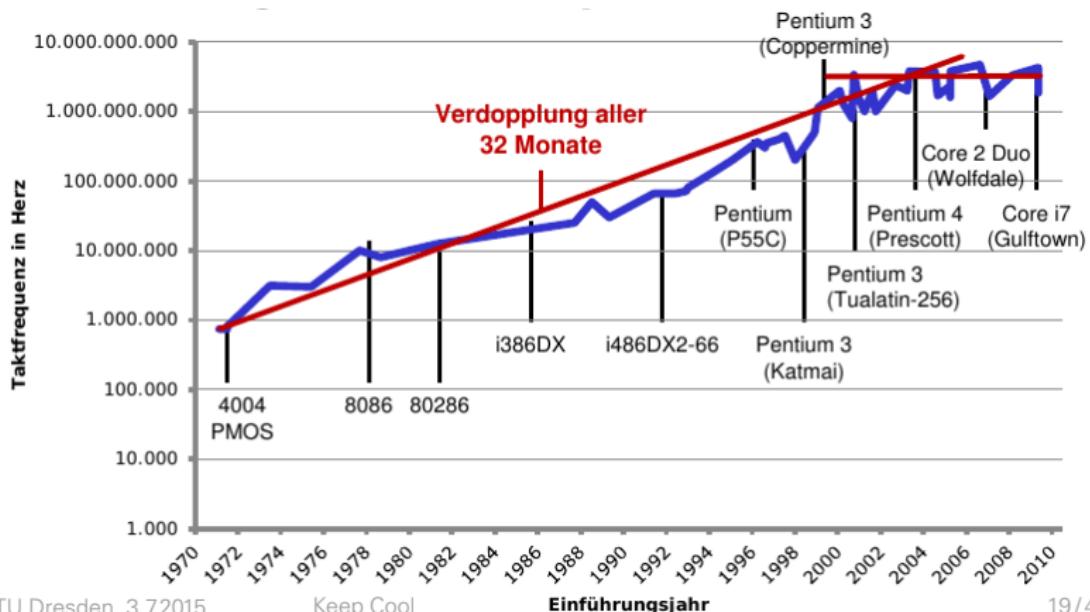
Bei jedem Takt müssen Ladungsträger in den Bauelementen bewegt werden
Je weniger Zeit dafür zur Verfügung steht, desto höhere Spannungen werden dafür benötigt.

Konsequenz

Hoher Takt

- schneller Umladen
- höhere Spannung
- höherer Umladestrom
- es wird **warm**

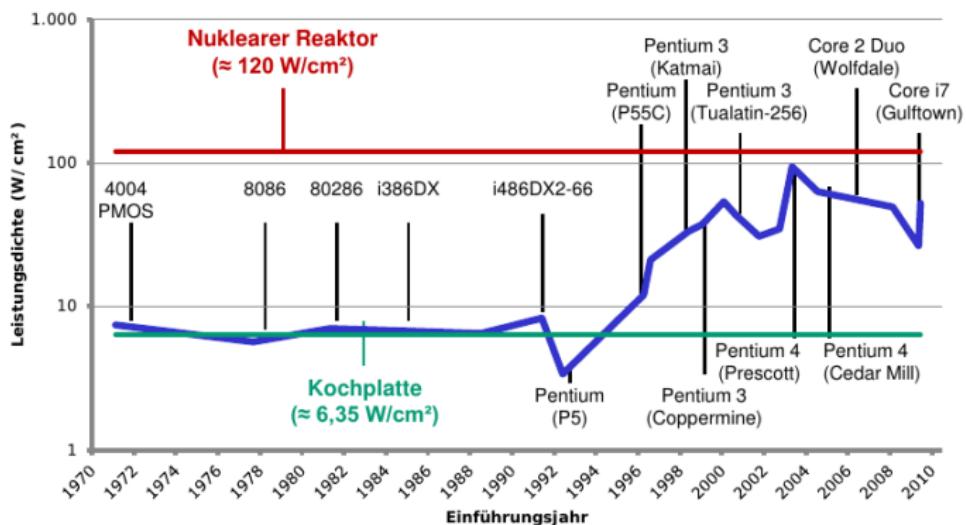
03 Die Grenze des Möglichen



03 Kurz und Bündig

Wir plazieren immer mehr Bauteile ...
... immer dichter zusammen ...
... wobei sie immer schneller ...
... und damit wärmer werden.

03 Wärmedichte im Vergleich



04 Mechanischer Verschleiß

Material dehnt sich abhängig von der Temperatur aus.

Der Grad der Ausdehnung ist abhängig vom Material.

Durch die unterschiedliche Ausdehnung entstehen Risse in den Bauteilen.

04 Elektromigration

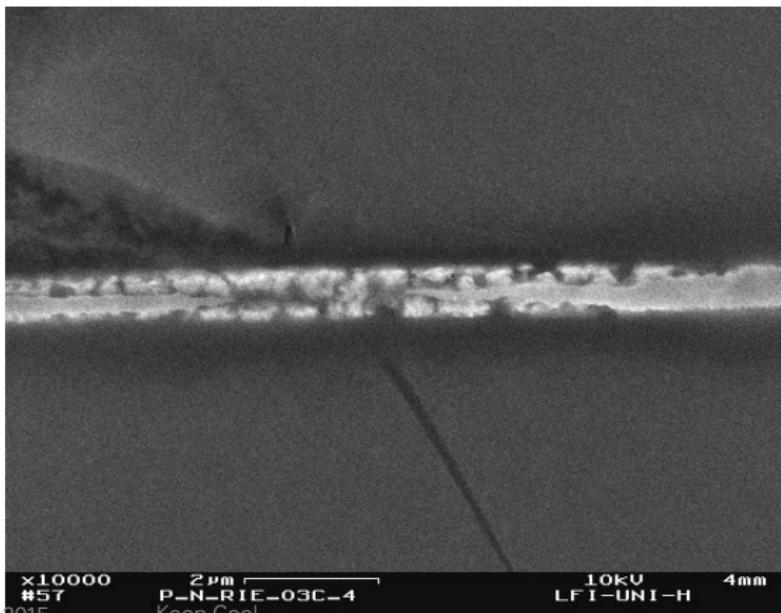
Mit der Temperatur steigt die Wahrscheinlichkeit, dass Metallionen aus der Leiterbahn ausbrechen...
... und sich woanders neu anlagern.

Dadurch können Leiterbahnen ausgedünnt werden oder Kurzschlüsse erzeugt werden.

Sudden Northwood Death Syndrome

Häufiger Ausfall von übertakteten Pentium 4 - Prozessoren durch Elektromigration

04 Im Bild



04 Kondensatoren

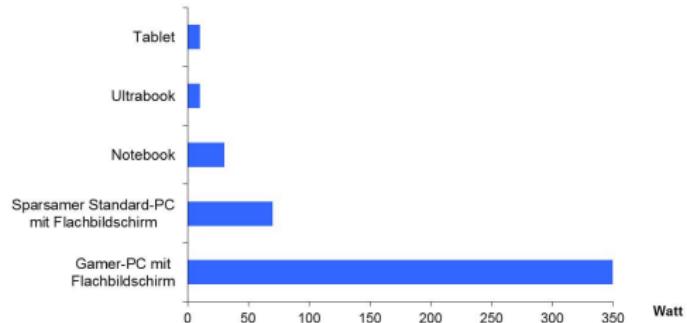
Daumenregel

Je 10°C Umgebungstemperatur halbiert sich die verbleibende Lebensdauer eines Kondensators

Dies wird verursacht durch chemische Prozesse im Kondensator
→ Arrhenius-Gleichung

Kondensatoren in Hardware sind oft absichtlich zu schwach bemessen.

04 Energiekosten



Merke

Eingesetzte Energie soll in Rechenleistung umgesetzt werden, nicht in Abwärme.

05 Kräftig pusten I

Idee

Mithilfe eines Lüfters kühle Umgebungsluft über heiße Komponenten leiten.

Nicht vergessen:

- Erhitzte Luft ableiten, sonst droht ein Hitzestau
- Luftstrom von unten nach oben richten
- Lüfter nachlaufen lassen, um Restwärme abzubauen

05 Kräftig pusten II

Aber...

- Geräuschpegel
- Reinigung notwendig
- Mechanischer Verschleiß
- Wärmeübergang von Hitzequelle zum Lüfter

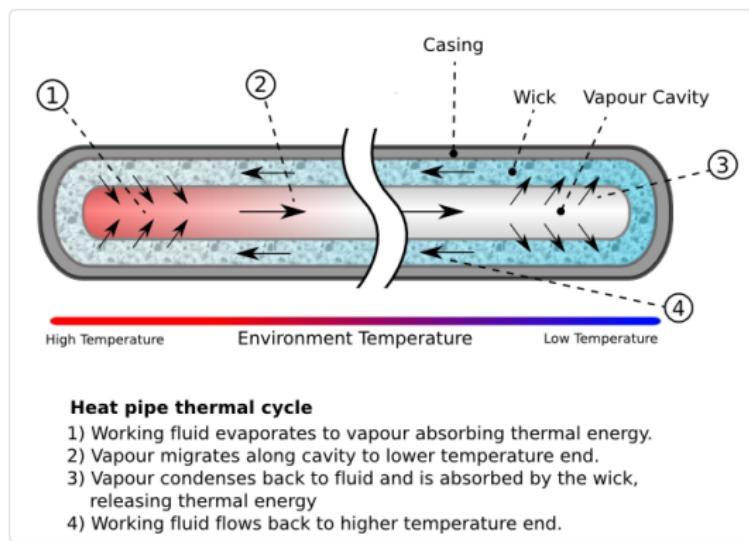
05 Zm Vergleich



Links: Pentium Overdrive (1993) mit Kühlkörper

Rechts: Pentium 4 (2005) mit Lüfter und Kühlrippen

05 Heatpipes



05 Heatpipe im Querschnitt



05 Kühflüssigkeiten I

Kühflüssigkeiten (und -gase) können schneller mehr Wärme aufnehmen.

Erwärmtes Kühlmittel von der Wärmequelle ableiten und in einem Wärmetauscher wieder abkühlen.

Kühlwasser sollte destilliert sein, um im Leckfall Schäden zu verhindern.

05 Kühlflüssigkeiten II

Aber

Man muss die Wärme erstmal bis zum Kühlmittel bekommen...

Flüssigmetalle auf Basis von Quecksilber oder Gallium haben bessere Wärmeleiteigenschaften als Wasser.

Technologie hat sich jedoch (bisher) nicht durchgesetzt.

05 Kühlgase

Stickstoff wird bei -196°C flüssig, Helium bei -269°C
Durch die extreme, aber kurzzeitige Kühlung sind Schäden am System wahrscheinlich.

Achtung

Bei den niedrigen Temperaturen kondensiert Sauerstoff aus der Luft.
Verbindungen mit flüssigem Sauerstoff (LOX) sind sehr explosiv!

05 Tauchbad I

Idee

Komponenten direkt in das Kühlmittel hängen.

Das Kühlmittel sollte ein schlechter elektrischer Leiter aber ein guter Wärmeleiter sein.

- Transformatorenöl
- Bastler nehmen auch Pflanzen- oder Motorenöl

05 Tauchbad II



05 Einschub: Dotieren

In den Siliziumkristall, aus denen die Chips bestehen, werden gezielt Verunreinigungen eingebracht.
Dadurch ändern sich an dieser Stelle die Materialeigenschaften.

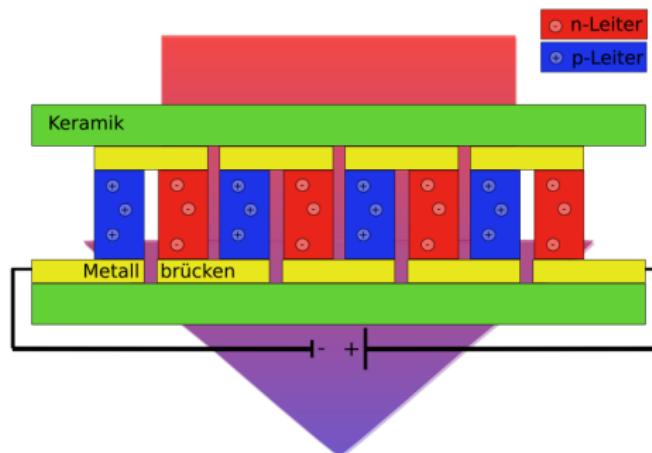
n-dotiert Es gibt mehr Elektronen als vorher (z.B. durch Phosphor)

p-dotiert Es gibt weniger Elektronen als vorher (z.B. durch Bor)

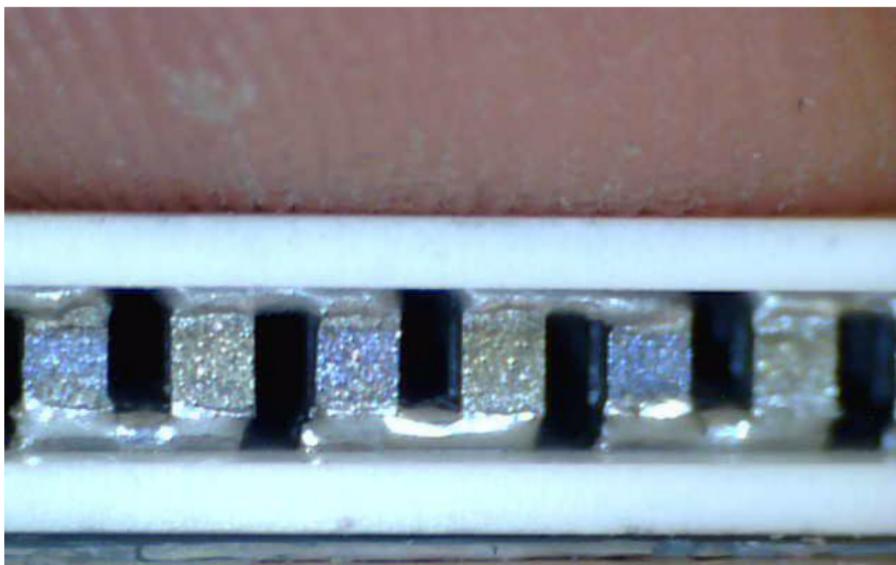
05 Der Peltier-Effekt

Gehen Elektronen aus einer **n-dotierten** Schicht in eine **p-dotierte** Schicht über, wird Wärmeenergie aufgenommen.

Anders herum wird Wärmeenergie abgegeben.



05 So sieht das dann aus



05 In der Praxis

- Mäßiger Wirkungsgrad
- Nur kleine Elementgrößen produziert (60mm x 60mm)
- Kann kühlen und heizen (Stromrichtung umkehren)
- Als passives Kühllement in Sensoren, Lasern, Kühlboxen, Messgeräten

06 Energie sparen via Software

Idee

Software kennt ihre eigenen Anforderungen am besten.

Energie soll möglichst gezielt eingesetzt werden, indem man Komponenten (Prozessor, Netzwerk. . .) nur so schnell wie unbedingt nötig betreibt.

06 Selbst regulierende Hardware

Moderne Hardware misst nebenbei die eigene Temperatur.

Bei Erreichen einer kritischen Temperatur wird die Taktfrequenz verringert oder es werden Takte ganz ausgelassen.

Aber: kann Rechenleistung beeinträchtigen

06 Zukunftsmusik: Biocomputing

Idee

Man benutzt die chemischen Eigenschaften von DNA oder RNA, um komplexe Berechnungen durchzuführen.

RNA = Ribonukleinsäure,

DNA = Desoxyribonukleinsäure

Der Ansatz verspricht enorme Rechen- und Speicherleistung bei sehr geringem Energiebedarf.

Er scheitert aber noch an der technischen Umsetzung.

06 Machen Wir das Beste daraus

Idee

Wenn wir Abwärme nicht verhindern können, heizen wir eben damit.

In Rechenzentren ist das Verfahren bereits etabliert.
Ein Markt für Privathaushalte entwickelt sich langsam.

06 Die letzte Folie

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit.

