

# Alternative Speichermedien 2

Von Hendrik Schmidt

Seminar: Speichermedien WS08/09  
Betreuer: Julian M. Kunkel, Olga M.

## Problemstellung

- Haben wir die Grenze unserer momentanen Technologie erreicht?
- Entfernung von langlebigen Speichermodulen

Die derzeitige Speichertechnologie scheint seine Grenzen erreicht zu haben. Selbst der Flash-Speicher wird voraussichtlich keine Größe von über 1TB erreichen! Die vor kurzem veröffentlichte Festplatte von Seagate (1.5TB) ist zwar nochmal ein Schwung nach oben, aber auch diese ist nur aus mehreren Platten zusammengepresst. Es ist also fraglich, ob dieses weiterhin möglich ist!

Viele Forscher sind dieser Meinung, dass es Zeit wird sich nach anderen, alternativen Energien umzusehen (oder alte wieder hervorzukramen). Im Folgenden werde ich versuchen ein paar dieser Ideen vorzustellen.

## Übersicht

- Versuche (Spielereien)
  - Elektronen-Spin
  - Atom-Speicher
  - Papier
- Forschungen (Zukunftsblick)
  - Peviar
  - Phasenwechselspeicher
  - Polystyrolkugel
  - Molekular-elektronischer Datenspeicher
  - Quantenmagnetspeicher

Am Anfang versuche ich ein paar kleine Versuche zu zeigen. Diese beinhalten gewisse Theorien die dann im späteren wiederzuerkennen sein sollten. Man sollte jedoch immer beachten, was man erwünscht zu erzielen und was zur Zeit realistisch ist.

# Versuche

- Elektronen-Spin
- Atome
- Papier

## Elektronen-Spin

- Pressebericht:  
„ $\text{Co}_2\text{Cr}_0.6\text{Fe}_{0.4}\text{A}_1$  ist ein Material aus dem in Zukunft vielleicht noch kleinere Datenspeicher mit noch höherer Speicherdichte gebaut werden können“

Eine wissenschaftliche Zeitung brachte diesen „Bericht“ im Jahre 2005 heraus. Hier ging es um eine spezielle Formel, die wohl neue „bahnbrechende“ Erkenntnisse versprechen sollte. Leider konnte man bisher nichts wieder von dieser Formel hören. Dieses zeigt, dass vieles auf dem ersten Blick „toll“ erscheint, es aber in Wahrheit alles komplizierter ist.

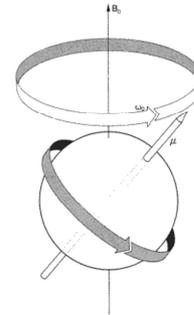
## Elektronen-Spin - Prinzip

Es wird genutzt:

- Elektronische Ladung
- Eigenrotation von Elektronen (Spin)

Hohe Spinpolarisation

Drehung im oder gegen den Uhrzeigersinn (1/0)



Hohe Spinpolarisation an der „Fermi-Kante“

Die zuvor genannte Formel sollte der Grundbaustein für dieses wissenschaftliche Experiment sein:

Es basiert darauf, dass man zu der elektronischen Ladung eines Elektrons auch die Eigenrotation aus Datenspeicher benutzt. Je nach dem in welche Richtung das Elektron rotiert, könnte man eine 1 oder 0 darstellen.

Damit dieses einen Erfolg verspricht ist folgendes nötig:

Hohe Spinpolarisation: möglichst viele Elektronen in der gleichen Richtung ausgerichtet

Fermi-Kante: Trennlinie zwischen mit Elektronen besetzten und unbesetzten Zustände

$\text{Co}_2\text{Cr}_{0.6}\text{Fe}_{0.4}\text{A}_1$  wäre theoretisch eine geeignete Verbindung, die dieses erfüllt, aber scheint sich in den letzten Jahren nicht wirklich als diese herausgestellt zu haben.

Dennoch kam es 2008 zu folgender Meldung:

Dänischen Forschen ist es erstmals gelungen den Elektronenspin elektrisch zu kontrollieren. Wie genau, ist jedoch noch nicht an die Presse gelangt.

# Atome

Idee:

- 1 Bit = 1 Atom

→ Speichern der gesamten Weltliteratur auf einer Briefmarke

Wenn man sich nun ein anderes Thema anschaut, wird einem klar, dass dieses durchaus potential verspricht: Atome

Falls es wirklich irgendwann möglich wäre auf kleinster atomarer Ebene (ein einzelnes Atom) Nullen und Einsen darzustellen, könnte man theoretisch die gesamte Weltliteratur auf einem Gegenstand mit der Größe von einer Briefmarke abspeichern.

# Atome

## „Spinpolarisierte Rastertunnelmikroskop“

### Lesen:

- Bestimmen der magnetischen Eigenschaften einzelner Atome

### Probleme:

- Schreiben, Kosten (Mikroskop sehr selten)

Hier gibt es beim derzeitigen technologischen Entwicklungsstand jedoch schonmal ein paar Probleme. Eines der wenigen Technologien, um auf einer atomaren Ebene Daten zu erfassen wäre z.B. das spinpolarisierte Rastertunnelmikroskop. Dieses ist sehr selten und auch sehr teuer. Davon abgesehen, dass dieses auf einer Betriebstemperatur von  $-270^{\circ}$  betrieben werden muss.

Zudem fehlen weiterhin die Ideen etwas direkt an diesen Atomen zu verändern (Schreibmechanismus).

# Papier

- Einfach:
  - Schreiben: Spezialdrucker
  - Lesen: Scanner
  - Pigmentationscode auf Papier

„Hundert Gigabyte an Daten auf einem Papier“

→ Theoretisch möglich, praktisch nicht

Ein Student hat es vor ein paar Jahren mit folgender Idee in die Zeitung geschafft: Das Speichern von Informationen auf Papier. Hier war nicht das handelsübliche „Schreiben“ gemeint, sondern das Abspeichern von Bits und Bytes. Rein Theoretisch wäre es mit einem handelsüblichen Drucker möglich einzelne Punkte zu erzeugen und je nachdem ob auf einem bestimmten Raster ein Punkt dargestellt wird oder nicht, könnte man es als 1 oder 0 interpretieren. Als Lese-Medium könnte man auch einfach einen Scanner benutzen.

Damals behauptete der Student jedoch mehrere hundert Gigabyte speichern zu können. Wenn man Punkte erzeugen könnte, die klein genug sind, wäre dieses vielleicht auch möglich.

## Papier - Hochrechnung

- DPI = dots per Inch
- Inch = Zoll = 2,54cm

Guter Laser-Drucker:  
2400x600 dpi

DinA4:  
29,7cm x 21cm = 11,7“ x 8,3“

→  $(2400 \times 11,7) \times (8,3 \times 600) = 28080 \times 4980 = 139.838.400$   
dots/A4  
→  $139.838.400 \text{Bit} = 17.485.500 \text{Byte} = 17,4855 \text{Mbyte}$

Hier eine kleine Beispiel-Rechnung: Aber auf mehrere Gigabyte kommt man zur Zeit eher nicht

Achtung: dies hier sind DPI, nicht PPI!

## Forschungen

- Peviar
- Phasenwechselspeicher
- Polystyrolkugel
- Molekular-elektronischer Datenspeicher
- Quantenmagnetspeicher

# Peviar

Imaging & Media Lab (IML )  
Uni Basel

## Peviar

- Juni 2006
- Projekt zur Entwicklung einer „digitalen Speicherlösung zu Archivierungszwecken“
- Daten sollen für lange Zeit aufbewahrt werden (>100 Jahre)

Peviar wurde ins Leben gerufen, da man erkannt hat, dass sich die Technologie immer weiter von einem Langzeitspeicher entfernt. Flash hat eine potentielle Abnutzung und auch Daten auf herkömmlichen Festplatten halten nur noch wenige Jahrzehnte. Früher hat man essentiell wichtige Dokumente auf ein Papier geschrieben, dieses konserviert und gut aufbewahrt. Dieses ist aufgrund der enormen Datenmengen nicht mehr möglich. Man möchte eben mehr als nur eine Bibliothek, sogar ganze Kulturgeschichten für die Ewigkeit niederschreiben und aufbewahren können. Deshalb musste eine Lösung gefunden werden, lange (mehrere Hundert Jahre) eine große Anzahl an Informationen aufzubewahren.

## Peviar - Das Projekt

- Hohe Speicherdichte
- Gute Fehlerkorrektur
- Hohe Zuverlässigkeit
- Langlebigkeit
- (Kostengünstig)

Folgende Bedingungen hat sich das Projekt zum Ziel gesetzt

		
<p><b>LANGFRISTIG</b></p>	<p><b>MITTELFRTISTIG</b></p>	<p><b>UNVERÄNDERBAR</b></p>
<p>Ultrastabil Selbsterklärend Hybridfähig (Daten, Text und Bilder)</p>	<p>Revisionsicher Migrationslos Ohne Folgekosten</p>	<p>Digitales Siegel Digitale Unterschrift Digitales Zertifikat</p>
<p>Peviar erfüllt mit dem visuellen Charakter die höchsten Anforderungen an Datensicherheit</p>	<p>Peviar muss nicht migriert werden, ideal für revisions-sichere Dokumente im Unternehmen</p>	<p>Entwickelter Film kann nicht mehr manipuliert werden</p>

Das Projekt versucht seine Ziele mit früheren Methoden zu vergleichen. Zum einen muss es langfristig sein, wie früher das „in Stein-Meißeln“, aber auch mittelfristige Komponenten, wie z.B. Migrationslosigkeit/-einfachheit, beinhalten. Zudem, damit es nicht von Manipulationen erfasst werden kann, sollte es auch noch Unveränderbar sein. Es muss also möglich sein ein „Siegel aufzutragen“, um die Echtheit zu gewährleisten.

Quelle: [www.peviar.ch](http://www.peviar.ch), Vortrag in Karlsruhe

## Anwendung auf die IT

	Klassisch	Computertechnik
Datenträger	Pergamin, Papyrus, Papier	Lochstreifen, Fotomaterial, Rosetta-Storage
Format	Latein Griechisch Englisch	TIFF, AIFF RTF, PDF/A ASCII, XML
Interface	Auge (visuell)	Kamera Scanner

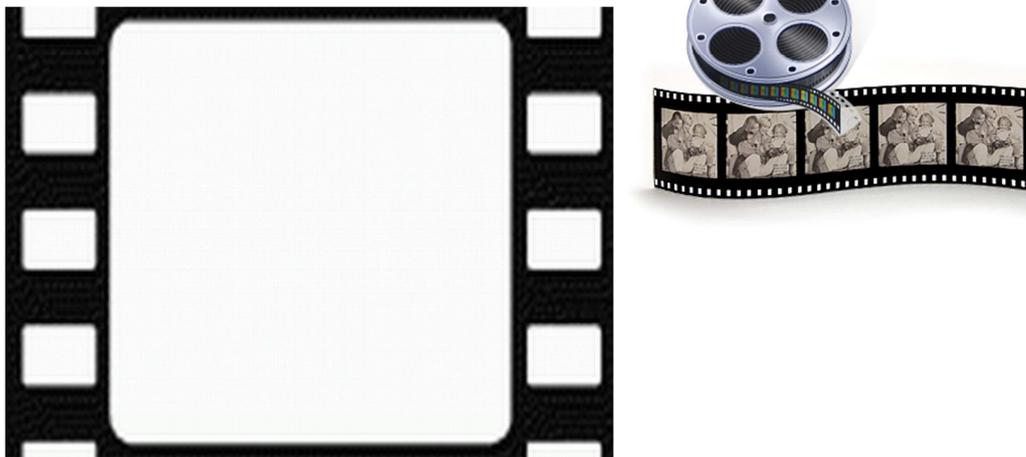
Noch einmal ein kleiner historischer Vergleich

## Peviar - Das Projekt

- Lösung: Mikrofilm (~ 500 Jahre)
  - 600m lang, 35cm Ø → 25GByte
- Zum Vergleich:
  - Bibel: 5 Mbyte
  - Enzyklopädie: 500Mbyte
  - akademische Bibliothek: 1000Gbyte
  - nationale Bibliotheken: 2000Gbyte

Nach langer Forschung kam heraus, dass der Mikrofilm wohl als bestes Medium in Frage kommt. Dieser ist lange haltbar, und mit einer großen Kompression ist es sogar möglich bis zu 25Gbyte zu speichern.

## Peviar



Es ist jedoch gegenüberzustellen, dass eine größere Kompression für eine schlechtere Lesbarkeit sorgt. Wie bereits im vorigen Kapitel, wäre es theoretisch sogar möglich das Medium mit handelsüblichen Scannern zu „lesen“. Da Scanner ein Bestandteil der üblichen EDV ist und es wahrscheinlich auch bleiben wird, hat es zum einen den Vorteil, dass es geringe Anschaffungskosten haben wird (Aber: momentane Scanner sind noch nicht gut genug → Peviar profitiert von der technischen Entwicklung der Scanner) und in naher Zukunft auch keine Migrationskosten anfallen werden. Die Optik (Scanner) wird immer in der EDV benötigt werden. Falls aus irgendwelchen unbekanntem Gründen es eines Tages jedoch keine Scanner mehr geben sollte, würden die Migrationskosten jedoch relativ gering ausfallen.

Zusammengefasst:

Falls wenig Kompression → von einfachen Scannern lesbar → billig

Hohe Kompression → mehr Speicherplatz → mikroskopisch kleine Strukturen →

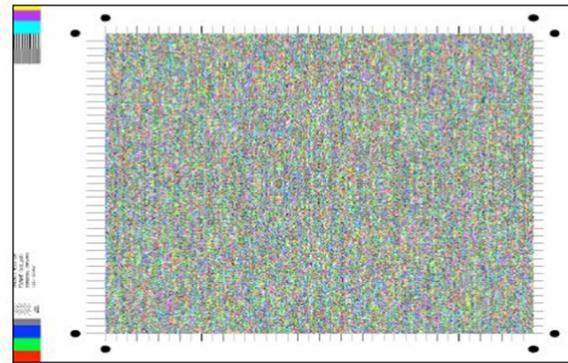
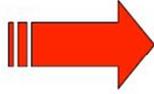
Vergrößerungsoptik nötig

## Peviar

### Vorteile Mikrofilm:

- Chemisch irreversibel
- Evtl Migrationkosten sind gering  
(Optik wird es immer geben)
- Informationen zum Datenträger möglich  
(Bild zur Inhaltsbeschreibung)
- Weiterentwicklung Scannertechnologie  
→ Vorteil für Peviar

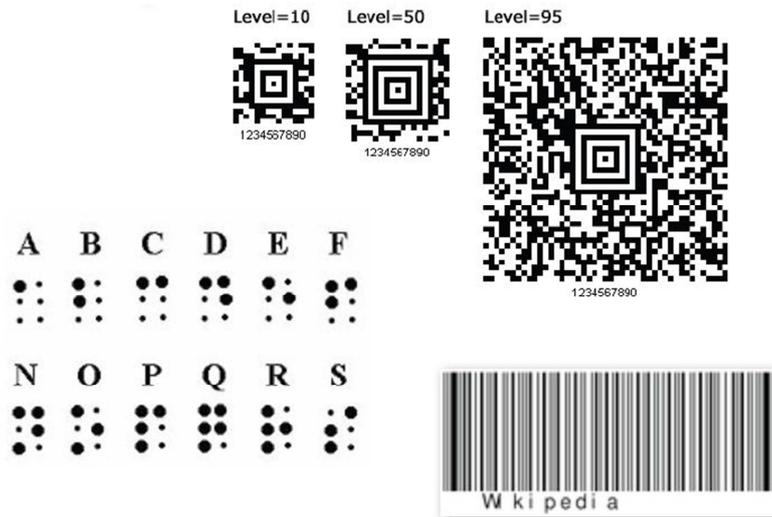
## Peviar - Beispiel



Beliebiger Bit-Code wird in Form eines 2D Barcodes wiedergegeben

Ein kleines Beispiel, wie eine Kodierung eines Bildes aussehen könnte, wenn es auf ein Barcode digitalisiert wird.

## Peviar - Beispiel 2



Solche „Barcodes“ sind auch schon seit längerem bekannt und im Einsatz. Besondere Kodierungstechniken sind also gar nicht nötig, um Peviar zu verwirklichen.

Wir erinnern uns an den Aztec-Code, den die Bahn bei ihren Online-Fahrkarten benutzt: Diese hat sogar eine hervorragende Fehlerkorrektur. Sofern die Daten pro Raster relativ gering ausfallen, könnte man hiermit sogar eine Fehlerkorrektur von bis zu 40% erreichen.

Ein weiteres Beispiel ist der Barcode im Supermarkt. Auf fast jeder Ware befindet sich heutzutage solch ein Etikett, wo der Name des jeweiligen Produkt geschrieben steht.

# Phasenwechselspeicher

(Phase Change Memories)

## PCMEM - Geschichte

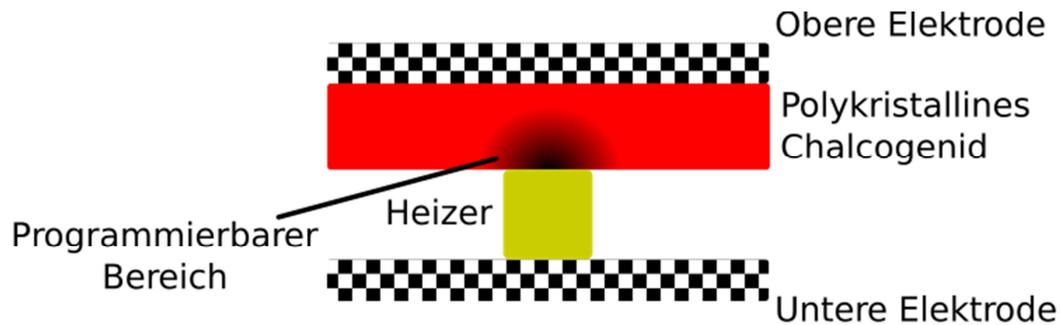
- 1920 Entdeckung der elektrischen Leitfähigkeit von Chalkogenid ( $\text{MoS}_2$ )
  - 1968 erster Vorschlag zur Verwendung von Speicher
  - 2006 Samsung stellt 256/512 Megabit-Prototyp für Flash Chips vor
  - 2007 Intel: Alderstone
- Erstes PCRAM 2008/2009

Das nächste Projekt beschäftigt sich mit der Legierung „Chalkogenid“. Diese Legierung wird bereits bei CD-RW oder DVD-RAM's benutzt.

Generell handelt es sich hier um einen nicht-flüchtigen Speicher, wird aber aufgrund der Schnelligkeit und der geringen möglichen Größe, wird er als RAM publiziert.

Chalkogenid-Legierung (chemische Verbindung aus Chalkogen-Elementen: Schwefel, Selen, Tellur mit Arsen, Germanium, Phosphor, Antimon, Blei, Bor, Aluminium, Gallium, Indium, Titan, Natrium)

## PCMEM - Aufbau



Das Prinzip ist relativ einfach. Von Natur aus besitzt das Material eine kristalline Konsistenz.

**Reset State:** Mit einem Strompuls höherer Stromstärke (mehrere hundert Mikroampere) geringer Dauer (~50 Nanosekunden) erhitzt man das Material. Aufgrund seiner Beschaffenheit kühlt es jedoch sehr schnell wieder ab und verbleibt sogar im amorphen Zustand!

**Set State:** Falls man nun einen längeren Strompuls durch das Material schickt (ca. 100 Nanosekunden) mit geringerer Stromstärke (mehrere zehn bis wenige hundert Mikroampere), wird es über die Kristallisationstemperatur erhitzt und lange genug auf dieser Temperatur gehalten, dass die Keimbildung einsetzt, welches die Kristallisation des Chalkogenids zur Folge hätte.

Je nachdem, ob das Chalkogenid sich im amorphen oder kristallinen Zustand befindet, besitzt es einen anderen elektrischen Widerstand. Diesen kann man mit einfachen Mitteln messen und es ist möglich ein Bit auszulesen.

Amorph: ungeordneter Zustand

Kristallin: geordneter Zustand

## PCMEM - Entwicklungstand

- Eignung hauptsächlich für RAM
  - Schnell/geringe Größe
- Zusammensetzung des Materials weiterentwickelbar
  - Erhöhung des elektr. Widerstands
- Verbesserung der thermischen Isolation
- Verwendung von Bipolartransistoren (teuer)

Obwohl das Chalkogenid sich für einen nicht-flüchtigen Speicher eignet, wird er zur Zeit nur für RAM's eingesetzt. Der Grund hierfür ist die geringe Größe, in der der Speicher zur Zeit hergestellt werden kann und die Schnelligkeit des Lese/Schreibeprozesses.

Obwohl die Geschwindigkeit nicht mit den aktuellen RAM's mithalten kann, ist mit dem PCMEM ein Lichtblick für die Zukunft entstanden. Mit der Optimierung der Thermischen Isolation, Verwendung von Bipolartransistoren oder der Erhöhung des elektrischen Widerstandes wäre es möglich noch schneller zu schreiben, aber auch mehr Speicher zur Verfügung zu stellen.

# Polystyrolkugel

## Polystyrolkugeln

- Kugeln enthalten fluoreszierende Farbstoffe
- Veränderung der optischen Eigenschaften
  - Jede Kugel repräsentiert Datenbit 1 oder 0

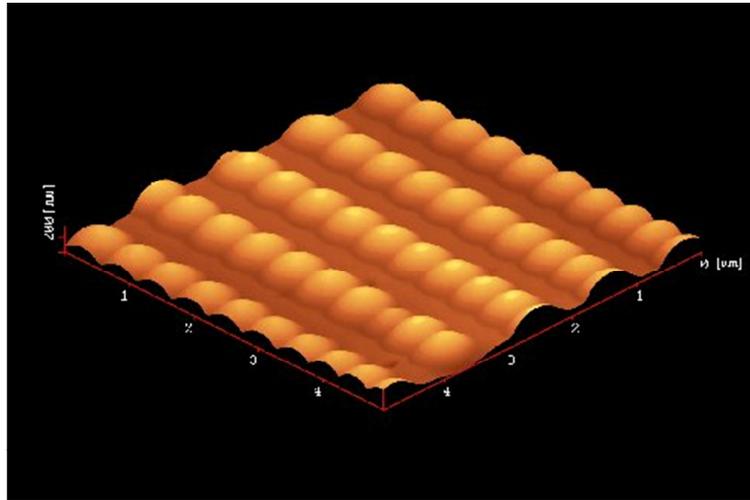
→ Nanotechnologie

Polystyrolkugeln besitzen von sich aus keine effiziente Möglichkeit Daten zu speichern. Das Prinzip beruht jedoch darauf diese Kugeln mit fluoreszierenden Farbstoffen zu bestreichen und die optische Eigenschaft zu verändern.

# Polystyrolkugel

Gitter aus  
Polystyrol-  
Kugeln

Ø 500nm



Momentanes Forschungsobjekt

Eine Kugel: Durchmesser ~500 Nanometer

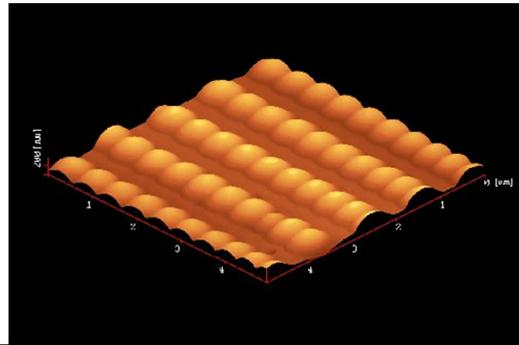
## Polystyrolkugel

Schreiben → grüner Laser → Veränderung des Winkels,  
unter dem das einfallende Licht von dem Kügelchen  
zurückgeworfen wird

Lesen → Roter Laser → Rotes Licht

Bit nach reflektiertem Licht:

0	wenig Licht
1	viel Licht



Falls man solch eine fluoreszierende Polystyrolkugel mit einem grünen Laser bestrahlt, würde man die optische Eigenschaft verändern (genauer: siehe Vortrag Holographischer Datenspeicher). Bei dem bestrahlen mit einem roten Laser hätte man nun eine Veränderung feststellen können. Je nachdem ob sie vorher von einem grünen Laser bestrahlt wurde, würde weniger oder mehr Licht zurückgeworfen werden.

## Polystyrolkugeln - Forschung

- Dreidimensionale Beschichtung
- Kleinere Kügelchen

→ „mindestens doppelt so hohe Speicherdichte wie bei der DVD“

Da dieser Speicher eine dreidimensionale Beschichtung zulässt, kann man mit kleineren Kügelchen eine von bis zu 10 mal höhere Speicherdichte als eine DVD erreichen.

# Molekular - elektronischer Datenspeicher

## MeD - Halbleiterindustrie

- Ziele der Halbleiterindustrie:
  - Bis 2020 DRAMs mit einer Speicherdichte von 100 Milliarden pro  $\text{cm}^2$
  - Im Moment ca. 4 Milliarden

## MeD - Aufbau

400 parallele Silizium - Nanodrähte  
über  
400 parallele Titan - Nanodrähte

- Kontakt durch Rotaxan-Moleküle
  - Bistabiler molekularer Schalter
    - (+/- Spannungsimpuls)
    - Position durch Messung der elektr. Leitfähigkeit abfragbar → Jedes Molekül = 1 Bit

Um diesen Zielen nachzukommen, versucht sich die Halbleiterindustrie in der Nanotechnik. Ein bekanntes Prinzip zum Ansteuern mehrerer Speicherelemente ist ein Gitter. Um auf kleinster Atomarer Ebene Daten zu speichern, versucht man ein Gitter auf Nanometer-Ebene herzustellen.

Der Molekular-Elektronischer Datenspeicher ist ein kleines Beispiel, um solch eine Ansteuerung zu ermöglichen.

Bei einem aktuellen Forschungsversuch wurden 400 parallele Silizium-Nanodrähte über 400 parallele Titan-Nanodrähte gespannt. Auf den Schnittpunkten befinden sich Rotaxan-Moleküle, welche aufgrund ihrer Beschaffenheit als molekulare Schalter fungieren können.

Mit einem positiven/negativen Spannungsimpuls ist es möglich diesen „Schalter“ umzulegen.

Rotaxan Form: Hantel, deren Schaft von einem Ringmolekül umschlossen wird

## MeD - Wahrheit

- Statt einem Rotaxan-Molekül 100 Moleküle gleichzeitig → Feinere Drähte nötig

SNAP (Superlattice Nanowire Pattern Transfer):

- Halbleiterschicht aus GaAs- und AlGaAs-Schichten
- Teilweise wegätzen der AlGaAs-Schicht  
→ Matrix mit feinen, parallelen Gräben
- Bedämpfen der Matrix mit Silizium/Titan

Leider muss man bedenken, dass es sich hierbei um mehrere 100 Moleküle, anstatt einem einzigen handelt. Weiterhin hat man Schwierigkeiten mit der Herstellung der Nanodrähte. Um diese herzustellen wurde das SNAP-Verfahren entwickelt, welches aber noch in den Anfängen ihrer Entwicklung steht.

## MeD - Wahrheit 2

- Von 160.000 Speicherzellen wurden 256 getestet:
  - Hälfte war fehlerhaft
  - Bits verflüchtigen sich innerhalb von 2 Stunden
  - Maximal 10 mal beschreibbar

Es wurde jedoch erfolgreich in einem Versuch solch ein Speicher hergestellt. Ein Test ergab jedoch, dass von 256 getesteten Speicherzellen ungefähr die Hälfte fehlerhaft war und demnach nicht verwendet werden konnte. Zudem hat sich herausgestellt, dass sich die Daten innerhalb von ca. 2 Stunden verflüchtigen und er nur bis zu ungefähr 10 Mal beschreibbar war.

# Quantenmagnet Speicher (QMD)

## QMD

- **Laser-Interferenz-Lithographie:**
  - Herstellung von ferromagnetischen Mikro- und Nanostrukturen aus Fe, Co, Ni und NiFe
  - Magnetismus auf Nanometer-Ebene

→1995 Idee: Speicher mit „dicht gepackten“ ferromagnetischen Nanostrukturen (Nanomagneten)

Prinzip: Jeder „Punkt“ soll nun einzeln magnetisierbar sein, um damit ein Bit pro Punkt zu speichern.

→1600Gbit/in<sup>2</sup> statt bisher 400Gbit/in<sup>2</sup> (Zoll)  
Weg zu einer Speicherdichte von über 1Tbit/in<sup>2</sup>

Dieses Verfahren ähnelt der herkömmlichen Lithographie („Steindruckverfahren“)

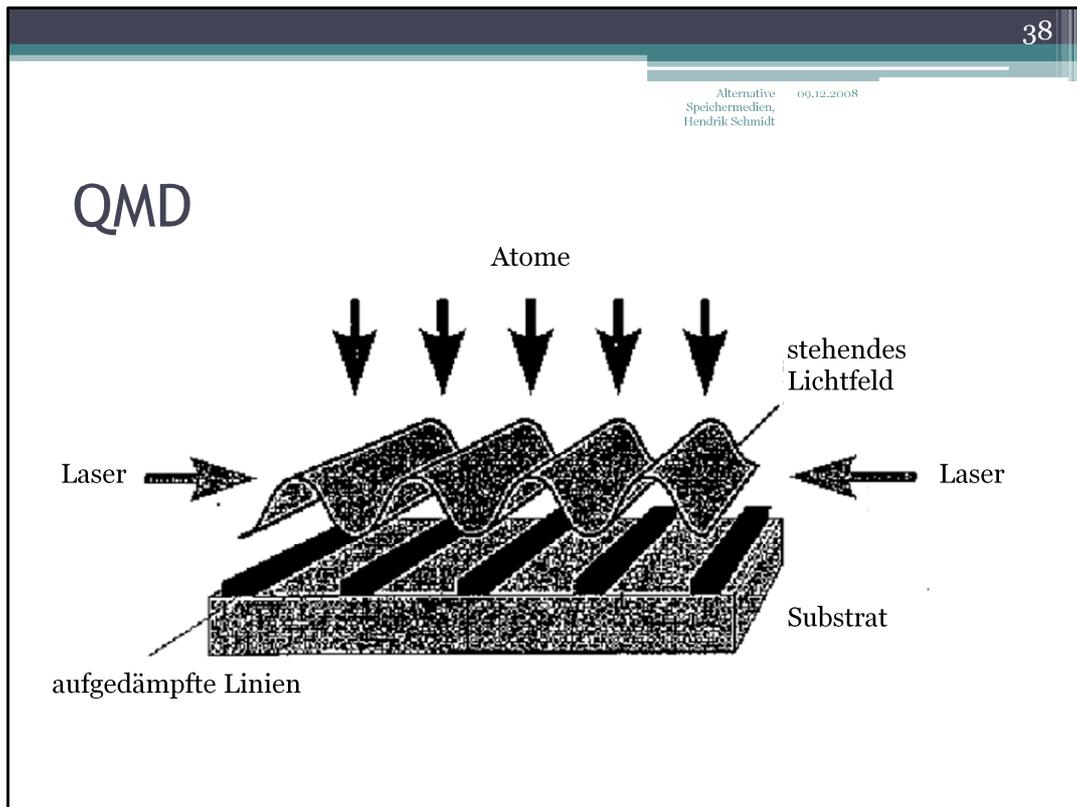
Lexikon:

NiFe – Permalloy

Fe – Eisen

Co – Cobalt

Ni - Nickel

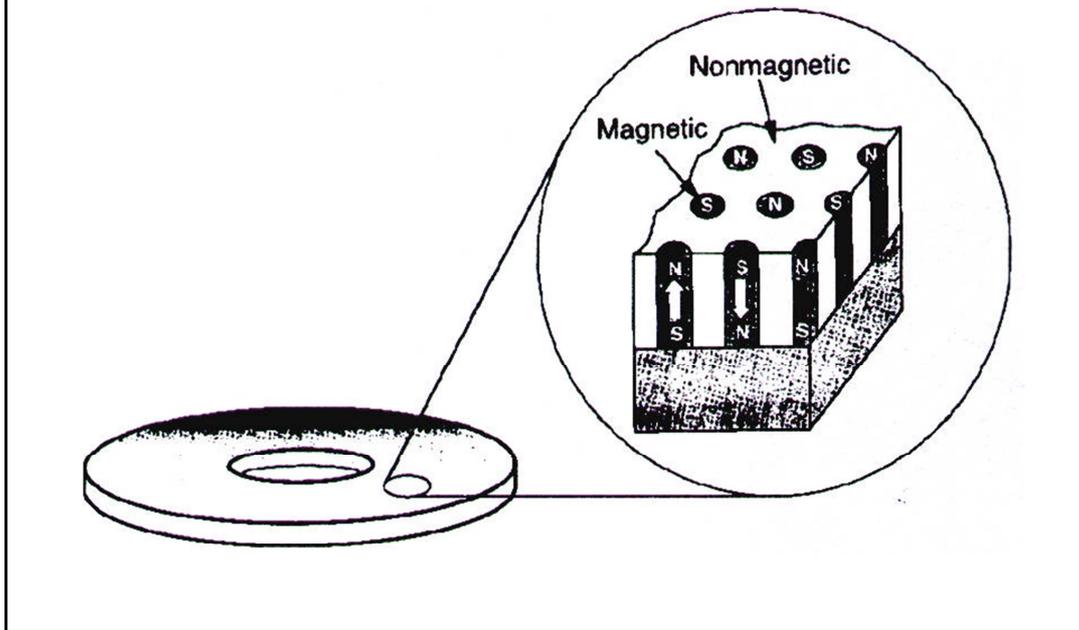


Erfunden von: Chu, Cohen-Tannoudji und Phillips (Physik-Nobelpreis 1997)  
→ Einfangen und Kühlen von Atomen

Erweiterung:

Wenn man nun verschiedene Lichtfelder überlagert, kann man nach diesem Prinzip mehrere parallele, punktförmige Atomstrahlen erzeugen. Dieses würde dann die Basis des Speichermediums darstellen.

Eine zusätzliche (bisher nicht getestete) Erweiterung wäre eine 3D-Modulation zu erstellen. Theoretisch wäre dieses mit dem Verfahren möglich!



Und so sieht das fertige Speichermedium aus (Prototyp):

Ni-Säulen mit etwa 20-50nm Durchmesser (zZ) mit Abstand von 100-200nm

Die Ni-Säulen sind so klein, dass die Magnetisierungsrichtung nur noch zum einen oder zum anderen Säulenende zeigen kann

Schreiben:

magnetische Anregung der magnetischen Spitzen  
(zum Beispiel mit einem Magnetkraftmikroskop)

Auslesen:

Si-Abtastspitzen , ähnlich AFM (Rasterkraftmikroskop bzw Atomkraftmikroskop)

AFM= Mikroskop zur Messung atomarer Kräfte auf Nanometerskala

## QMD

- Resistent gegen Korrosion
- Resistent gegen Reibung
- Jedes Bit → eigenes Element
  - Einfacherer Schreibprozess (schneller)
  - Kleinere Fehlerrate
  - Weniger Rauschen

Keine „tracking marks“ nötig

Minnesota University:

Compact Disks mit 400Gbit/in<sup>2</sup> in Pfennig-größe erfolgreich hergestellt

„Die Suche nach dem Datenspeicher der Zukunft  
ist mit der Suche nach dem Heiligen Gral  
vergleichbar“

Prof. Dr. rer. Nat. Matthias Wuttig, RWTH Aachen

## Quellen

- [http://www.upob.de/deutsch/nanotech/VDI\\_nanokosmos.pdf](http://www.upob.de/deutsch/nanotech/VDI_nanokosmos.pdf)
- [http://www.princeton.edu/~chouweb/publications/60%20Krauss\\_Fabrication%20of%20mechanical%20polishing\\_JVST%20B\\_1995.pdf](http://www.princeton.edu/~chouweb/publications/60%20Krauss_Fabrication%20of%20mechanical%20polishing_JVST%20B_1995.pdf)
- [http://de.wikipedia.org/wiki/Phase-change\\_random\\_access\\_memory](http://de.wikipedia.org/wiki/Phase-change_random_access_memory)
- <http://www.scinexx.de/wissen-aktuell-8057-2008-04-09.html>
- [http://www.macwelt.de/artikel/News/341807/papier\\_als\\_datenspeicher/1](http://www.macwelt.de/artikel/News/341807/papier_als_datenspeicher/1)
- <http://www.physikclub.de/aus-forschung-und-wissenschaft/neues-aus-der-forschung/molekular-elektronischer-datenspeicher>
- <http://www.wissenschaft.de/wissenschaft/gutzuwissen/249962.html>
- <http://www.shortnews.de/goto.cfm?id=623998&link=computerworld%2Eco%2Enz%2Fnews%2Ensf%2Fo%2FE48043E0448AA09FCC25717A0019D2CC%3FOpenDocument>
- [www.peviar.ch](http://www.peviar.ch)