

Alternative Digitale Speichermedien

Dozent: Prof. Dr. Thomas Ludwig
Betreuer: J. Kunkel, O. Mordvinova

Von: Markus Dreier
Datum: 02.12.2008

1/46

Herzlich willkommen zu meinem Vortrag heute werde ich euch etwas über alternative Speichermedien erzählen. Doch als erstes möchte ich mit euch die Gliederung meines Vortrages anschauen.

bei allen nachschauen welche geschwindigkeiten welche störeinflüsse

Inhalt

- Einleitung
- PMC
- Ferroelektrizität in Nanodrähten
- Bakteriorhodopsin
- Deinococcus Radiodurans
- Zusammenfassung

Einleitung

- Warum alternative Speichermedien nötig ?
- Welche Möglichkeiten gibt es ?
- Was benötigt man für die Entwicklung ?
- Welche Grenzen sind hierbei gesetzt ?

3/46

In der Einleitung möchte ich die folgenden Themen aufgreifen und zusammen mit euch erarbeiten.

Die Themen der Einleitung sind: Themen der Einleitung durchgehen

Als erstes möchte ich darüber reden, warum alternative Speichermedien überhaupt nötig sind.

Warum alternative Speichermedien

4/46

Was meint ihr weshalb es nötig ist, alternative Speichermedien zu entwickeln?

Auf kurzes Feedback warten dann die Punkte zeigen

Punkte erklären

Grenzen physikalischer Natur

Größe = physische Größe

Speicherkapazität

Kosten in Anschaffung, Herstellung, Wartung etc.

Dauer der Speicherung

Warum alternative Speichermedien

- Grenzen bisheriger Speichermedien
- Größe
- Speicherkapazität
- Kosten
- Dauer der Speicherung

4/46

Was meint ihr weshalb es nötig ist, alternative Speichermedien zu entwickeln?

Auf kurzes Feedback warten dann die Punkte zeigen

Punkte erklären

Grenzen physikalischer Natur

Größe = physische Größe

Speicherkapazität

Kosten in Anschaffung, Herstellung, Wartung etc.

Dauer der Speicherung

Welche Möglichkeiten gibt es

- Weiterentwicklungen bisheriger Medien
- Erforschung neuer Medien
- Physikalisch
- Biologisch

5/46

Um zu Alternativen Speichermedien zu kommen gibt es nun verschiedene Möglichkeiten.

Zum einen die Weiterentwicklung bekannter Medien, wobei man hier auch irgendwann auf sein gegebenen Grenzen stoßen wird.

Zum anderen die Erforschung neuer Medien, die in naher Zukunft die bekannten Medien anfangen werden zu ersetzen, da sie leistungsfähiger, energiesparender und zum Teil auch weitaus sicherer sind, als das bisher bekannte.

Hierbei gibt es physikalische als auch biologische Möglichkeiten.

Die physikalischen Möglichkeiten bestehen darin, dass in immer kleinere Strukturen vorgedrungen wird und mittels der bekannten Gesetzmäßigkeiten, Kombinationen versucht werden, die es bis zu einem Maximum ausreizen können.

In der Biologie liegt der Hauptaugenmerk auf Proteinen sowie Bakterien, wobei hier die Speichermöglichkeiten zwischen verschiedenen Codierungsmöglichkeiten und Übertragungsmöglichkeiten weitaus mehr variieren können als bei den physikalischen Speichermöglichkeiten.

Entwicklungsverfahren

6/46

Was meint ihr sind die Voraussetzungen für die notwendigen Entwicklungsverfahren?

wieder kurzes Feedback abwarten dann Punkte einblenden

Wissen

Fachleute

Geräte

Sponsoren

Massentauglichkeit

Entwicklungsverfahren

- Wissen
- Fachleute
- Geräte
- Sponsoren
- Massenmarkt

6/46

Was meint ihr sind die Voraussetzungen für die notwendigen Entwicklungsverfahren?

wieder kurzes Feedback abwarten dann Punkte einblenden

Wissen

Fachleute

Geräte

Sponsoren

Massentauglichkeit

Welche Grenzen

- Kosten
- Zeit
- Physikalische/Biologische Grenzen
- Massenmarkt?
- Personal
- Wissen

7/46

Welche Grenzen sind dem Ganzen nun gesetzt?

Es ist natürlich alles eine Kostenfrage, denn die Medien müssen zuerst einmal entwickelt werden, wenn keine Geldgeber vorhanden sind, kann auch keine Weiterentwicklung stattfinden, egal welche Aussichten das Medium hätte.

Die Zeit, sowohl die Produktionszeit, als auch die Entwicklungszeit muß in einer gewissen Relation stehen zur Anforderung des Mediums.

Die natürlichen Grenzen, die z.B. auch die Prozessorleistungsfähigkeit begrenzen und Einschränkungen machen bei der Größe der Dinge, der Leistungsfähigkeit etc. z.B. Luftwiderstand.

Dann die große Frage bei solchen Medien, ist es fähig für die Massenproduktion? Diese Frage ist gekoppelt mit dem ersten Punkt auf dieser Liste. Denn wenn ein solches Medium nicht massenfähig ist, somit sich nicht verkaufen läßt, haben Sponsoren keinen Anreiz ein solches Medium überhaupt zu erforschen und zu finanzieren, sofern es nicht unbedingt notwendig wird.

Personal und Wissen müssen in genügendem Maße vorhanden sein.

Inhaltsverzeichnis

- Einleitung
- **PMC**
- Ferroelektrizität in Nanodrähten
- Bakteriorhodopsin
- Deinococcus Radiodurans
- Zusammenfassung

PMC

- programmable metallization cell
- auch nano-ionischer Speicher
- Halbleiterspeicher
- entwickelt in der Arizona SU
- Konkurrenz zu Flash

9/46

kurzer einsehbar noch zu flash bild noch einfügen zu modellen

PMC ist kurz für programmable metallization cell und das bedeutet auf deutsch „programmierbare metallbeschichtete Zelle“

PMC gehört zu den Halbleiterspeichern und wird aufgrund seiner Eigenschaften auch nano-ionischer Speicher genannt.

Das ganze wurde von einer Gruppe um Michael Kozicki (Prof im Dept für Electrical Engineering) an der Arizona SU entwickelt und das erstmal 2001 von Axon Technologies patentiert.

PMC wird als Konkurrenz zu Flash mittlerweile gehandelt und nach einigen Prognosen kann es schon innerhalb kurzer Zeit, genaueres dazu später, in den Läden erhältlich sein.

Doch woraus besteht das ganze nun und wie ist es aufgebaut?

Aufbau von PMC (I)

- amorphe, glasartige elektrolyt Materialien
- mit Silberoxid dotiert
- Siliziumdioxid
- Kupfer als Dotierungsmaterial

10/46

Für PMC werden amorphe glasartige elektrolyt Materialien verwendet, die zu Anfang mit Silberoxid dotiert wurden. Dotieren erklären. Siliziumdioxid hat sich in der Verbindung mit Wolfram als gute Kombination bewährt ebenso wie Kupfer als Dotierungsmaterial.

Aufbau von PMC (2)

- 2 Metallelektroden
- dazwischen dünner Elektrolytfilm
- Kontroll-Transistor kann eingefügt werden
- entstehender „Nanodraht“

11/46

Im nächsten Bild zeig ich den Aufbau, den ich nun kurz erklären werde.

PMC besteht aus zwei Metallelektroden, von denen eine relativ inaktiv(wolfram) ist und die andere chemisch(kupfer) aktiv. Zwischen ihnen befindet sich ein dünner Elektrolytfilm durch den die entstehende Spannung laufen kann. Der Elektrolytfilm dient gleichzeitig als Isolator.

In das ganze kann noch ein Transistor eingefügt werden, was wichtig ist für das Auslesen der Daten.

Kein von Grundauf fester Bestandteil des Ganzen ist der Nanodraht, er entsteht erst im Laufe des Prozesses und macht die Leitfähigkeit zwischen den Elektroden aus.

Aufbau von PMC (3)



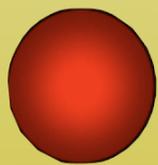
Oxidizable electrode



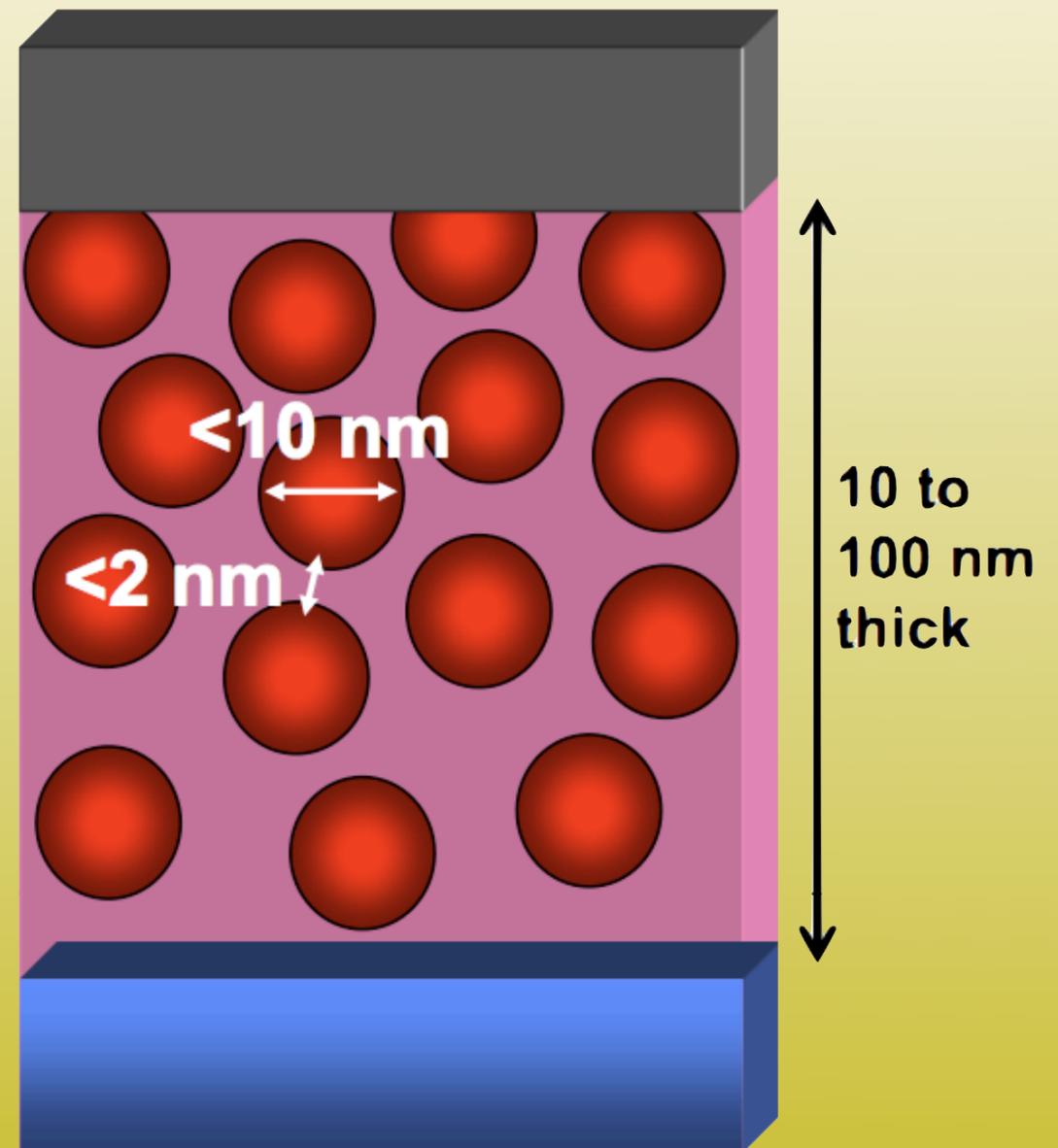
Inert electrode



Glassy insulator



Superionic region



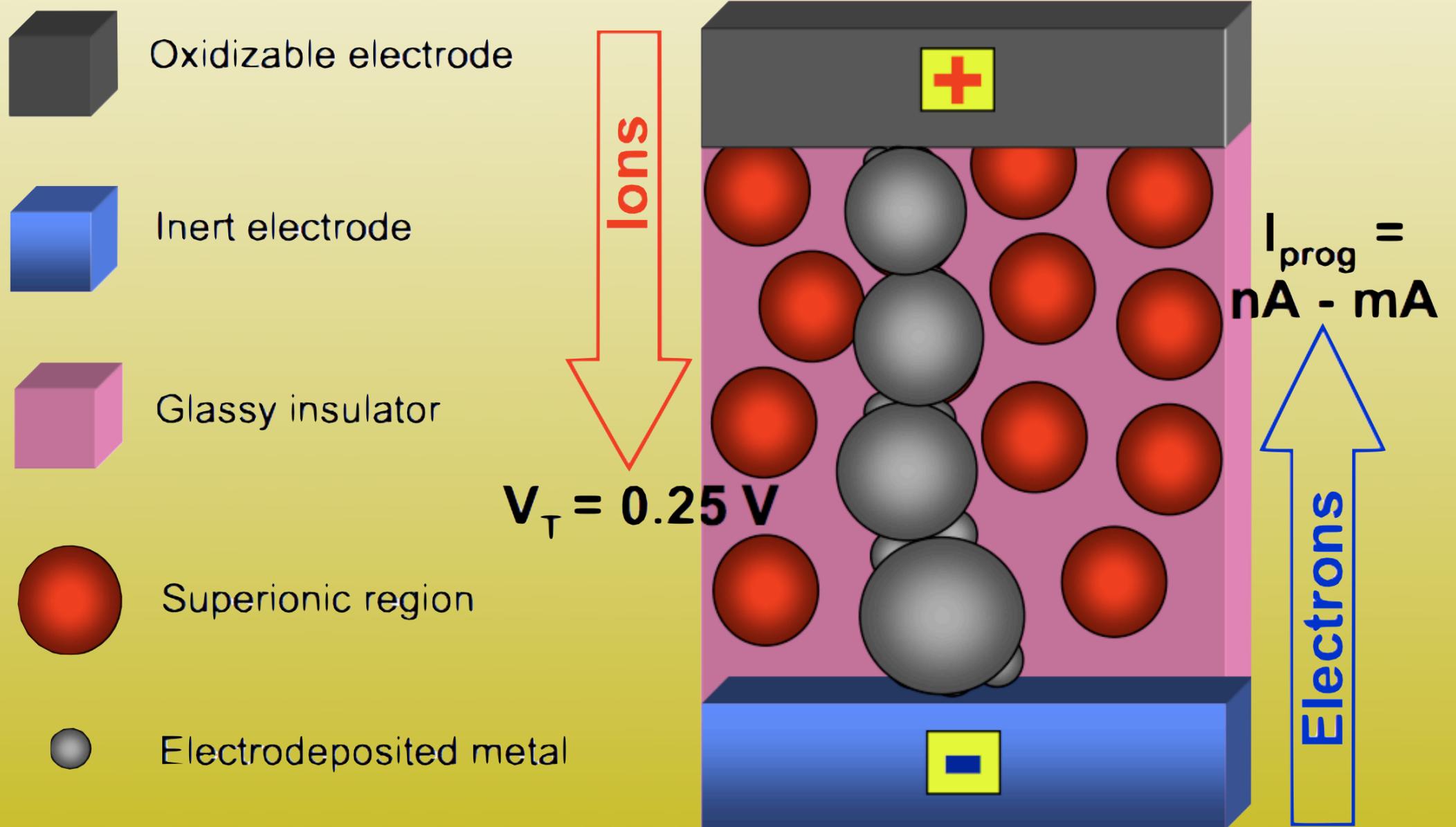
12/46

unten wolfram spezielle eigenschaften des materials
oben kupfer spezielle eigenschaften des materials
dazwischen elektrolyt nanodraht ist noch nicht zu sehen

Wie funktioniert PMC(I)

- Negativer Fluß an der „inert Electrode“
- Ionen aus Elektrolyt und nun positiver Elektrode
- „Nanodraht“ verbindet Elektroden
- Kette aus elektrodepositorischen Inseln oder Nanokristallen

Wie funktionier PMC (2)



14/46

unten negativer Fluß angesetzt
ist es positiv da sollte die Spannung hinströmen sofern der Nanodraht vorhanden ist.
Elektronen Ionen fließen über den nanodraht von einer Elektrode zur anderen.

Wie funktioniert PMC (3)

- Kontrolltransistor muss eingeschaltet sein
- „Nanodraht“ vorhanden?
 - Ja -> Niedrigerer Widerstand -> 1
 - Nein -> höherer Widerstand -> 0

15/46

wie liest und beschreibt man das ganze?

Der Transistor muß eingeschaltet sein um überhaupt den Zustand ablesen zu können.

Der Zustand wird wie folgt abgefragt:

Überprüfung ob Nanodraht vorhanden ist, ist er vorhanden = niedrigerer Widerstand = 1

ist er nicht vorhanden = höherer Widerstand = 0

Wie funktioniert PMC (4)

- Löschen auf ähnliche Weise
- Positiver Fluss an „inert Electrode“
- Ionen bewegen sich zurück in Electrolyt
- Zerstört „Nanodraht“ -> Ausgangszustand

16/46

Löschen funktioniert auf inverse Weise wie das Beschreiben.
Ein positiver Fluß wird an die inert Electrode angelegt, was zur folge hat, dass sich die Elektronen in das Electrolyt zurückbewegen und der Nanodraht quasi zerstört wird.
Somit ist der Ausgangszustand wieder hergestellt.

Warum als Datenspeicher nutzen

- Wenig Energieverbrauch
- Hohe Leistung
- 1000mal höhere Energieeffizienz als Flash
- eigentlicher Schreibprozess nahezu unendlich reversibel
- auf viel kleinerem Raum als Flash (bisher Theorie)

17/46

Dieser Datenspeicher, wurde schon im Vorfeld mit der Absicht entwickelt, größere Kapazitäten bei geringerem Energieverbrauch und hoher Leistung zu haben. An Daten kann man sagen, dass er eine 1000mal höhere Energieeffizienz hat, als Flash und dabei gleichzeitig wie schon erwähnt weniger Energie verbraucht und eine höhere Leistung vorweisen kann. Hinzu kommt, dass der Speicher durch die angewandte Methode (methode nochmal kurz umreißen) nahezu unendlich oft beschrieben werden kann. Was allerdings bisher noch Theorie ist, wäre dass ein viel kleinerer Raum als für Flash genutzt werden kann. Die ersten Modelle hierfür sollen schon nächstes Jahr(2009) auf den Markt kommen

Inhaltsverzeichnis

- Einleitung
- PMC
- **Ferroelektrizität in Nanodrähten**
- Bakteriorhodopsin
- Deinococcus Radiodurans
- Zusammenfassung

Ferroelektrizität in Nanodrähten

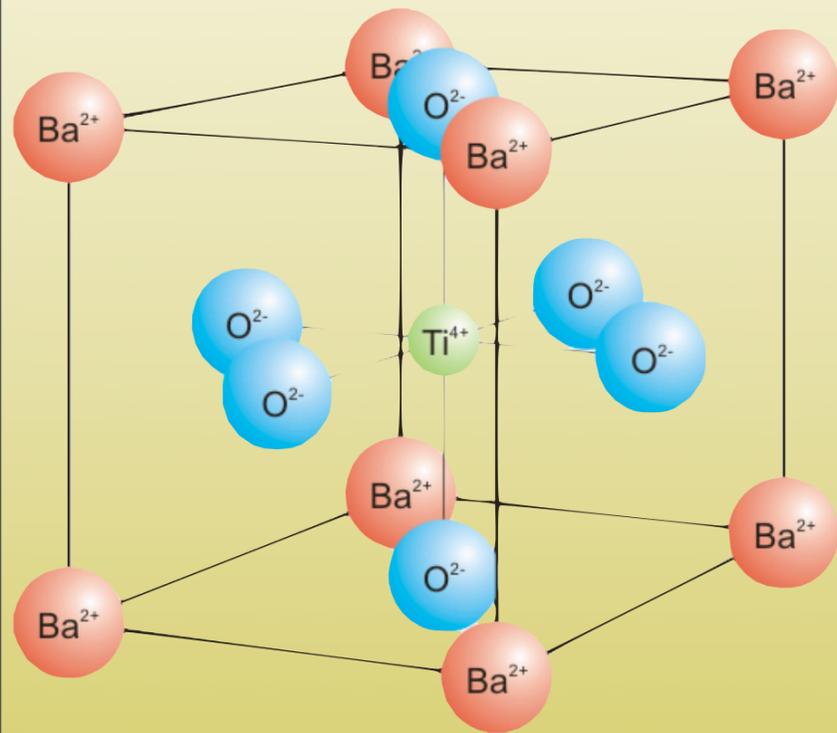
- Ferroelektrizität
- Stoffe mit elektrischem Dipolmoment
- erzeugt Spontane Polarisation
- kann paraelektrisch werden
- Polarisation kann umgekehrt werden

19/46

Ferroelektrizität bedeutet:

erro|elektrizität, Erscheinung, die bei gewissen pyroelektrischen Substanzen, den Ferroelektrika, auftritt. Ferroelektrische Kristalle zeigen spontane elektrische Polarisation, das heißt, sie sind bereits ohne ein angelegtes elektrisches Feld polarisiert. In einem Ferroelektrikum kann die Richtung der spontanen Polarisation durch ein genügend starkes äußeres elektrisches Feld in die Gegenrichtung umgeklappt werden. Die phänomenologisch-makroskopische Beschreibung der Ferroelektrizität steht in Analogie zu der des Ferromagnetismus, es treten Domänen (Bereiche mit homogener Polarisation) auf. Beim Erhöhen der elektrischen Feldstärke wächst die Polarisation nur bis zu einem bestimmten Wert (ferroelektrische Sättigung); die Polarisation durchläuft in Abhängigkeit von der elektrischen Feldstärke eine Hysteresekurve. – Atomistisch wird die spontane Polarisation durch Ionenverschiebung im Kristallgitter verursacht.

Bariumtitanat



- Wird für FeRAM benutzt
- Mischung aus Barium und Titan
- hohe Dielektrizitätskonstante
- Umordnungen bei hohen Temperaturen
- Vielfache Verwendungen

Dielektrizitätskonstante heißt mittlerweile Permittivität = durchlässigkeit von material für elektr felder

verwendungen: elektronik und sensorik aufgrund der vielfaltigen eigenschaften z.b. als kaltleiter oder in kondensator als dielektrikum

bild = kubische phase als ionengitter

kaltleiter = leitet besser bei niedrigen temepraturen

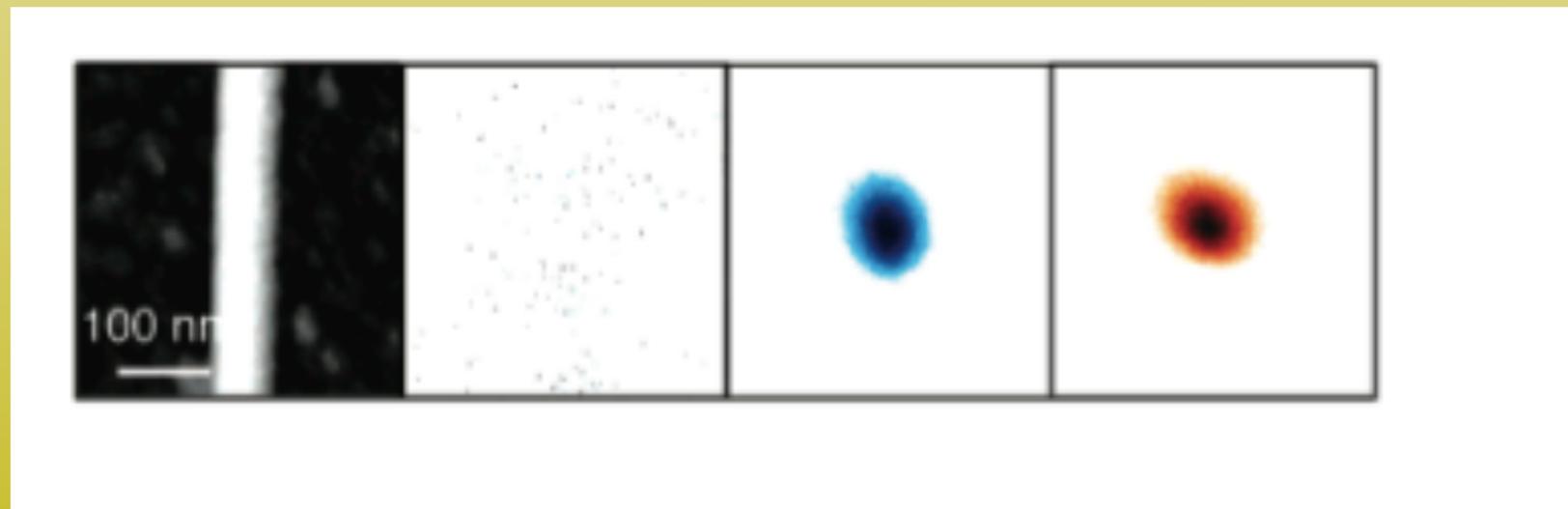
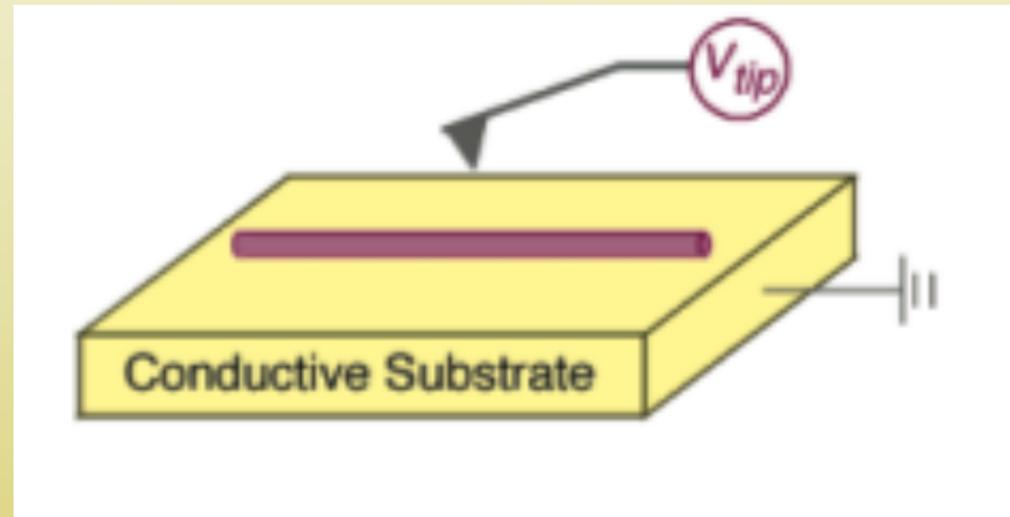
Neue Entwicklung(I)

- Nanodrähte aus Bariumtitanat
- bestimmter Durchmesser
- Zugabe von Wasser -> Durchmesser von 3nm
- bei niedrigen Temperaturen -> Durchmesser von 0,8nm
- Noch nicht komplett erforscht

21/46

Bei den ersten Experimenten arbeiteten die Forscher mit durchmessern von 10nm, was sich aber unter Zimmertemperatur und der Zugabe von Wasser auf 3nm reduzieren ließ. Aufgrund der Eigenschaften von Bariumtitanat, ist es theoretisch möglich den Durchmesser bei niedrigeren Temperaturen auf 0,3nm zu senken

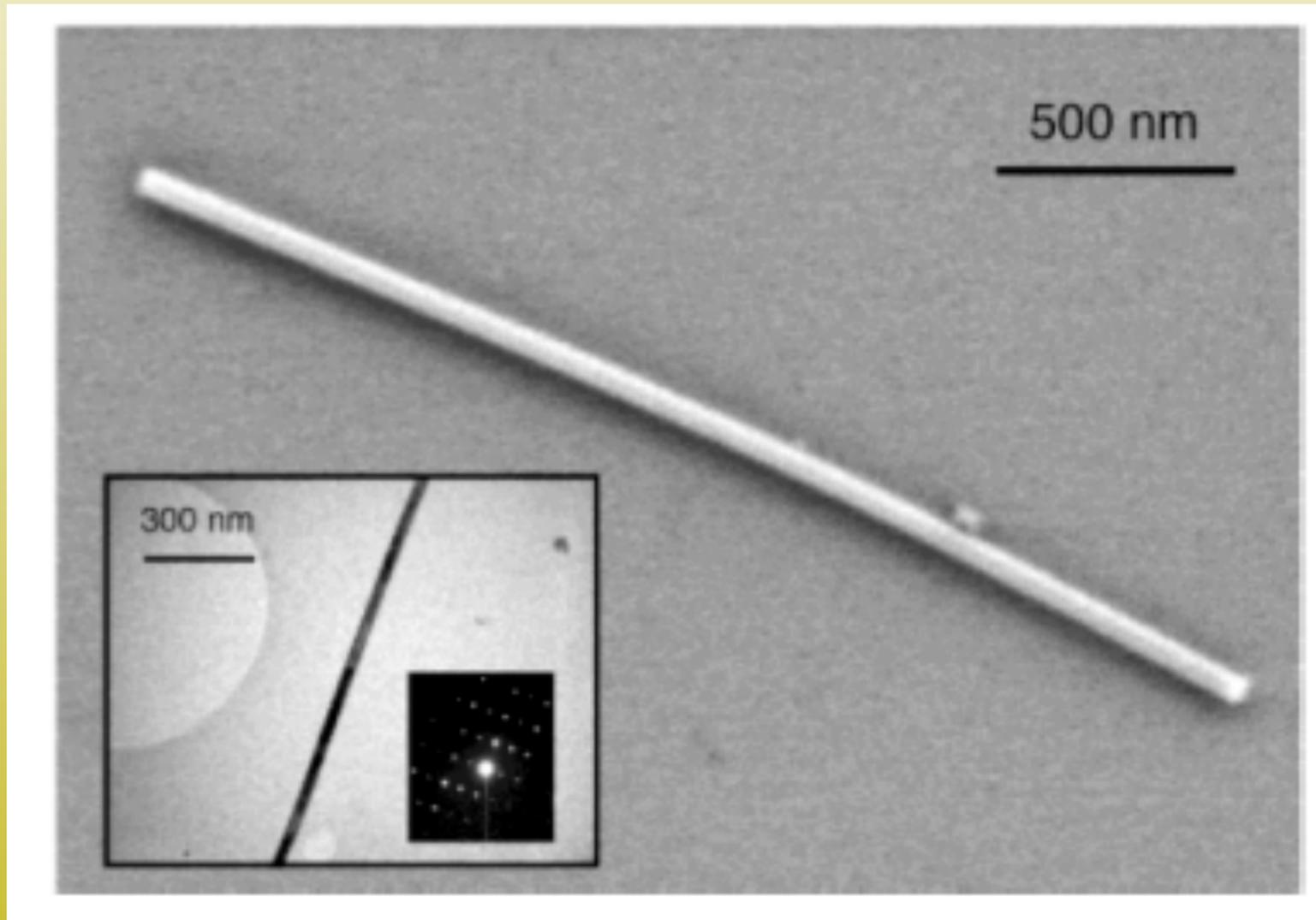
Neue Entwicklung(2)



22/46

bild 1 zeigt die experimentelle geometrie draht in leitfähiger substanz
bild 2 electrostatic force microscope 18nm draht erst topographisches bild dann as-
deposited
dann nach dem schreiben -10 , 0 , 10 rot weiß blau resonanzfrequenz

Neue Entwicklung (3)

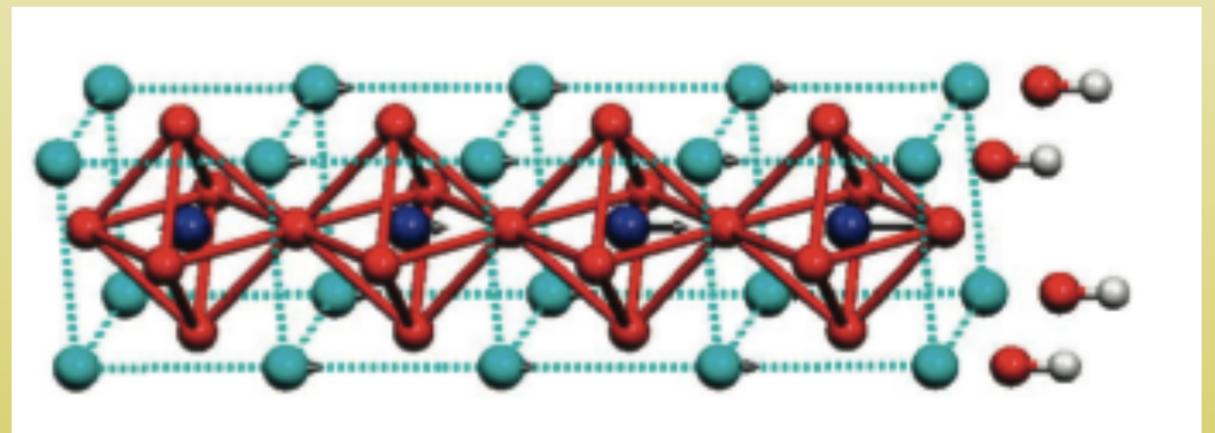
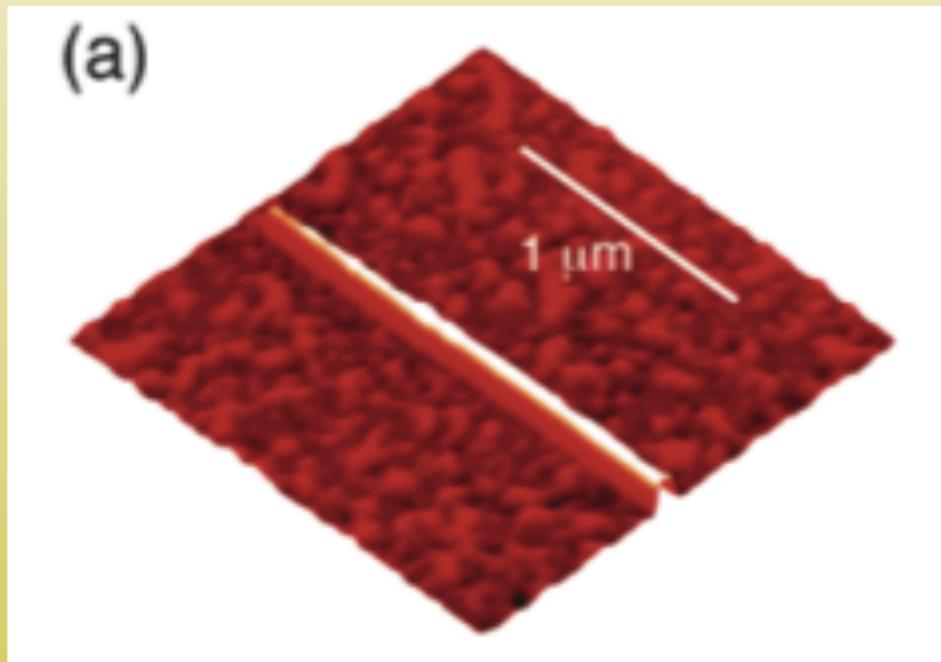


23/46

bild von einem nanodraht zum vergleich die meßlatte oben elektronen mikroskopische aufnahme.

im kleineren bild sieht man eine aufnahme mit convergent beam electron diffraction, diese methode dient zur charakterisierung von materialien im sub-mikroskopischen bereich

Neue Entwicklung (4)



- 100.000 Terrabit pro ccm

24/46

1. bild 12 nm aufnahme von bariumtitanatdraht
bild 2 struktur aufnahme von 1,6nm bariumtitanat bild
kobaltblau blau rot grau = varium, titan, sauerstoff wasserstoff

Speichereigenschaften

0



- Riesige Speichermöglichkeiten auf z.b. Ipod-Nano
- 300.000 Jahre ohne Wiederholung

Warum als Datenspeicher nutzen

- Riesige Speichermöglichkeiten auf engem Raum
- Weiterentwicklung schon bekannter Technologie
- Arbeit mit bekannten Materialien
- kann mit günstigen Materialien hergestellt werden

Inhaltsverzeichnis

- Einleitung
- PMC
- Ferroelectric in Nanodrähten
- **Bakteriorhodopsin**
- Deinococcus Radiodurans
- Zusammenfassung

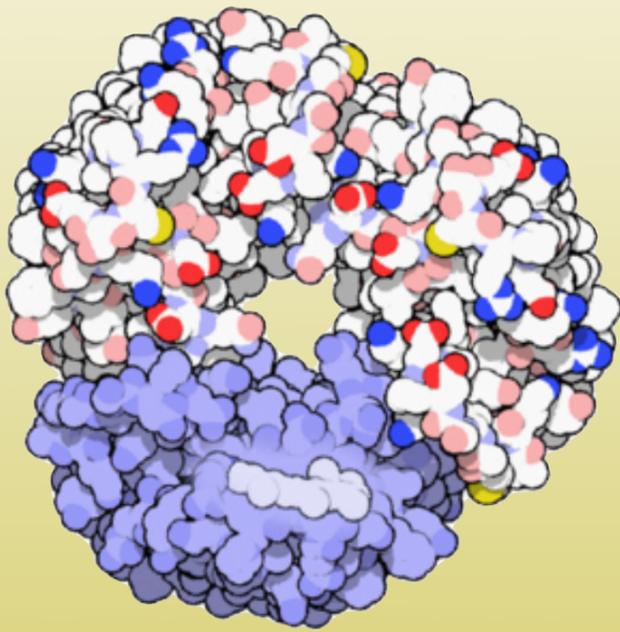
Bacteriorhodopsin

- Halobakterien
- Protein der Zellmembran
- Lichtenergie-Konverter
- Aufbau von Protonenkonzentrationsunterschied
- ATP-Synthese

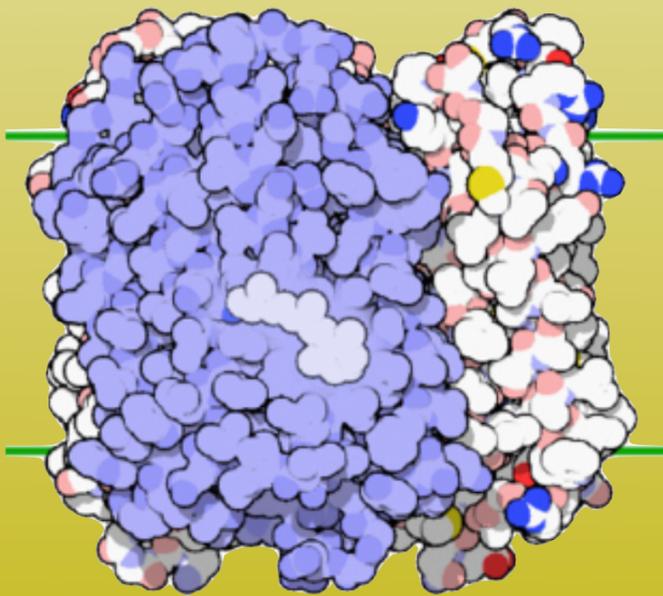
28/46

halobakterien vorwiegend in salzige umgebung
ähnlich photosynthese allerdings keine spaltung von wasser sondern aufbau von
protonenkonzentrationsunterschied und verschiebung davon

Bacteriorhodopsin (2)



- 248 Aminosäuren
- 7 fast parallele alpha-Helices
- durchzieht Zellmembran
- bildet Purpurmembran aus
- Stabilität gegenüber physikalischen / chemischen Einflüsse



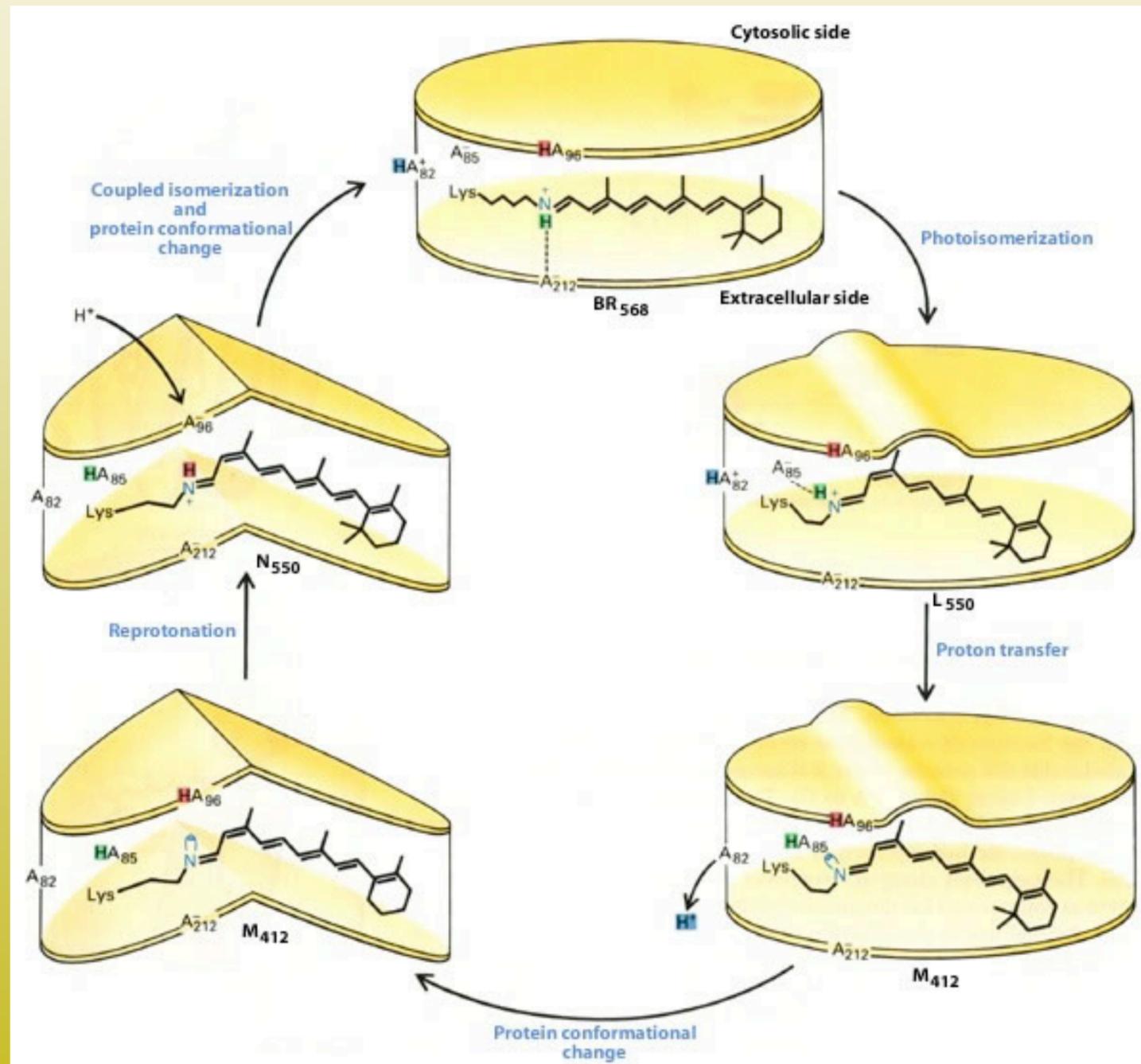
29/46

Bakteriorhodopsin ist aus 248 Aminosäuren aufgebaut die 7 fast parallele alpha-Helices bilden und die Zellmembran durchziehen. Das Protein bildet eine Purpurmembran aus und hat eine große Stabilität gegenüber physikalischen und chemischen Einflüssen.

Funktion des Proteins

- Lichteinfall
- Isomerisierung
- Änderung der Protonenaffinität
- Strukturelle Veränderung des Proteins
- Abgabe und Rückführung in Urzustand

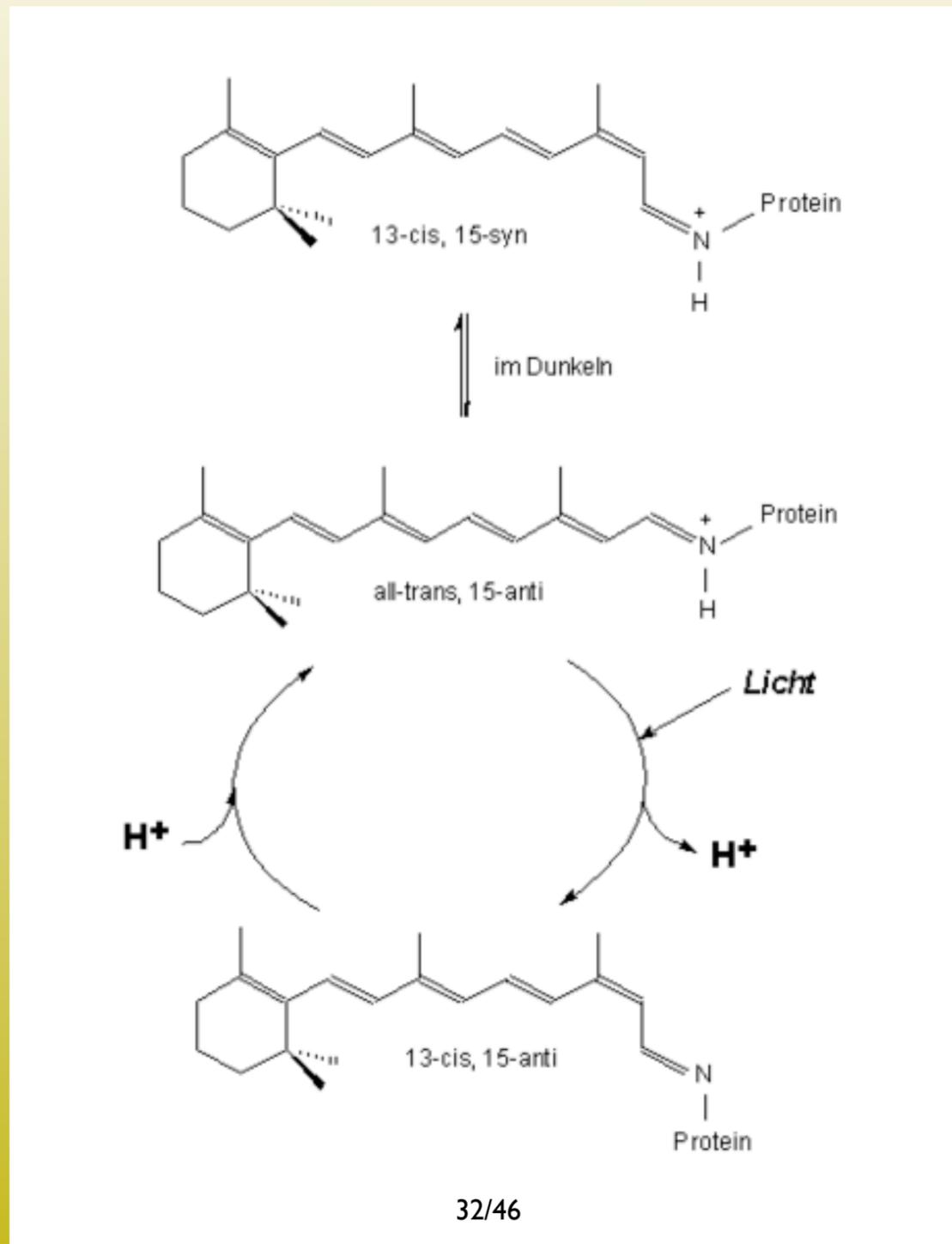
Chemische Reaktionen(I)



31/46

erklären was genau passiert dass elektronen durchgereicht werden etc

Chemische Reaktionen(2)



chemisch erklären was passiert

Wie als Datenspeicher nutzen

- Lichtempfindlichkeit
- starke Lichtbestrahlung
- hält zustand über mehrere Jahre
- binäre Belegung der erzeugbaren Farbzustände
- Aufwändige Technik zum Erzeugen und Auslesen der Daten

33/46

aufgrund der hohen lichtempfindlichkeit, hat Bacteriorhodopsin Eigenschaften die für die Zelle selbst wertvoll sind, aber wie kann man dies nun als Speichermedium benutzen?`
Man hat herausgefunden, dass bei starker Lichtbestrahlung sich der Zustand des Proteins so über mehrere Jahre hinweg fixieren läßt indem man im pico und nanosekunden Bereich, das Ganze mit Laserlicht bestrahlt. Die spezifisch entstandenen Zustände, je nach bestrahlung lassen sich nun binär belegen.
Allerdings benötigt man hierfür spezielle Geräte um das Ganze zu erzeugen und auch wieder auslesen zu können, was allerdings durchaus von Vorteil sein kann.

Warum als Datenspeicher nutzen

- mehrere MB pro cm^2
- rel. kopiersicher (DRM)
- Protein muss nicht künstlich erzeugt werden
- Rückverfolgbares Material
- Erzeugung von Sicherheitsmerkmalen

34/46

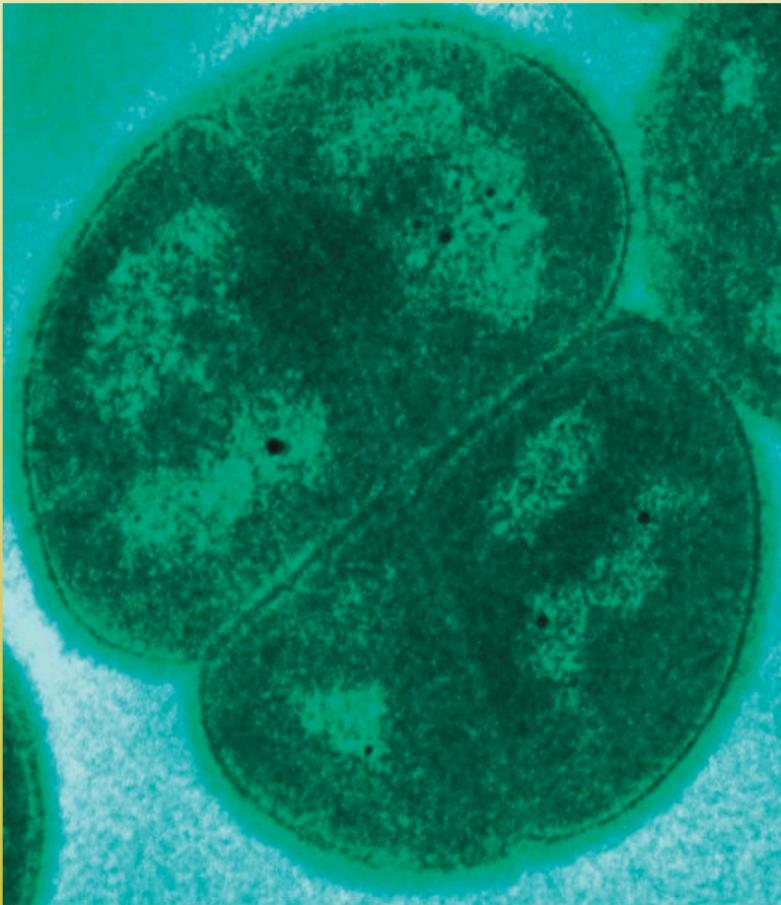
Von dieser Methode versprechen sich die Forscher mehrere MB pro qcm . Was zugegebenermaßen nicht sehr viel erscheint, wenn man jedoch andere Aspekte anlegt ist es ein sehr nützliches und sicheres Verfahren. ist ein ROM
Durch den Bedarf spezieller Geräte zum ein und Auslesen, wird es relativ kopiersicher, da solche Geräte nicht sehr leicht zu beschaffen sind und es nicht mit herkömmlichen Methoden kopiert werden kann.

Das Protein muß nicht künstlich erzeugt werden, was durchaus ein Ersparnis in der Herstellung sein kann. Desweiteren ist das Material absolut rückverfolgbar, das heißt durch die Art wie es letzten Endes hergestellt wurde, läßt sich genau feststellen woher es kommt. Bisher wird das Protein schon für die Erzeugung von Sicherheitsmerkmalen verwendet (Beispiele)

Inhaltsverzeichnis

- Einleitung
- PMC
- Ferroelektrizität in Nanodrähten
- Bakteriorhodopsin
- **Deinococcus Radiodurans**
- Zusammenfassung

DEINOCOCCUS RADIODURANS



- Bakterium(gehört zu grampositiven Kokken)
- hohe Strahlungsresistenz
- ab 10.000 Gy letale Dosis erreicht
- bei Mensch ab 7 Gy
- Röntgen- und Uv-Licht-Resistenz

36/46

1 gray = 1 J/Kg

kokken = kugelbakterien

grampositiv = färbung dunkelblau mit gibt auskunft über aufbau der zellwand

Strahlenresistenz

- effiziente DNA Reparatur
- spezielle Enzyme
- sogar Doppelstrangbrüche
- 500 Reparaturen gleichzeitig
- 4 gleiche Chromosome

37/46

e-coli schafft 2-3 gleichzeitig
4 chromosome findet rekombination statt

Wie funktioniert Datenspeicherung (I)

- Codierung der DNA

AAA - 0	AAC - 1	AAG - 2	AAT - 3	ACA - 4	ACC - 5	ACG - 6	ACT - 7
AGA - 8	AGC - 9	AGG - A	AGT - B	ATA - C	ATC - D	ATG - E	ATT - F
CAA - G	CAC - H	CAG - I	CAT - J	CCA - K	CCC - L	CCG - M	CCT - N
CGA - O	CGC - P	CGG - Q	CGT - R	CTA - S	CTC - T	CTG - U	CTT - V
GAA - W	GAC - X	GAG - Y	GAT - Z	GCA - SP	GCC - :	GCG - .	GCT - .
GGA - .	GGC - !	GGG - (	GGT -)	GTA - ^	GTC - ^	GTG - "	GTT - "
TAA - ?	TAC - ;	TAG - /	TAT - [	TCA -]	TCC -	TCG -	TCT -
TGA -	TGC -	TGG -	TGT -	TTA -	TTC -	TTG -	TTT -

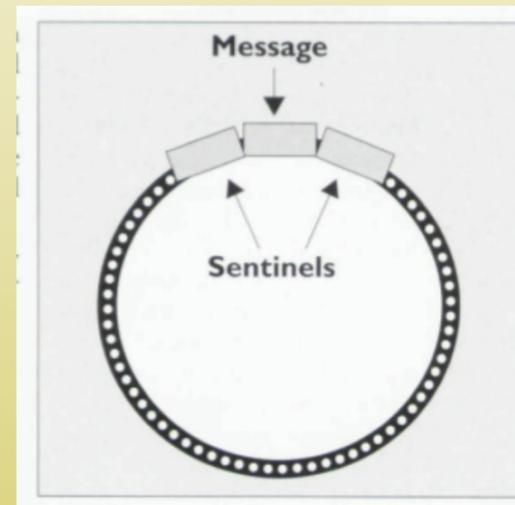
- erzeugen künstlicher DNA

38/46

erzeugen der dna
phosphorsäure, zucker, nukleobase
einfügen in clon vektoren die sich im bakterium selbst replizieren können.
die fertigen vektoren dann in e-coli einfügen
dann alles zusammen in deinococcus

Wie funktioniert Datenspeicherung (2)

- einfügen der DNA



- Vererbung über Generationen
- Bei Bedarf auslesen der DNA und Dekodierung der Daten

Rätsel

AAA - 0	AAC - 1	AAG - 2	AAT - 3	ACA - 4	ACC - 5	ACG - 6	ACT - 7
AGA - 8	AGC - 9	AGG - A	AGT - B	ATA - C	ATC - D	ATG - E	ATT - F
CAA - G	CAC - H	CAG - I	CAT - J	CCA - K	CCC - L	CCG - M	CCT - N
CGA - O	CGC - P	CGG - Q	CGT - R	CTA - S	CTC - T	CTG - U	CTT - V
GAA - W	GAC - X	GAG - Y	GAT - Z	GCA - SP	GCC - :	GCG - .	GCT - -
GGA - .	GGC - !	GGG - (	GGT -)	GTA - ^	GTC - ^	GTG - "	GTT - "
TAA - ?	TAC - ;	TAG - /	TAT - [	TCA -]	TCC -	TCG -	TCT -
TGA -	TGC -	TGG -	TGT -	TTA -	TTC -	TTG -	TTT -

CACATGCCCCCGAGGA
GAACGACGTCCCATC

Warum als Datenspeicher nutzen

- Speichern durch Vererbung
- Stabile Vererbung über Generationen
- große Kapazitäten
- höhere Resistenz gegen Datenverluste
- exakte reproduzierbarkeit der Daten

41/46

wissenschaftler kinderlied its a small world in bakterium abgespeichert und nach 100 generationen fehler frei ausgelesen
10⁹ bakterien pro mililiter
nochmals nachschauen welche speichermöglichkeiten dies birgt

Inhaltsverzeichnis

- Einleitung
- PMC
- Ferroelektrizität in Nanodrähten
- Quantenmagnetspeicher
- Bakteriorhodopsin
- Deinococcus Radiodurans
- **Zusammenfassung**

42/46

Zum Schluß möchte ich noch eine kurze Zusammenfassung bringen, über Alternative digitale Speichermedien im Allgemeinen.

Zusammenfassung

- Alternative Speichermedien notwendig
- Biologische und physikalische Möglichkeiten
- Verschiedene Anwendungsbereiche der Speichermedien
- Dauer bis zur Einsatzfähigkeit

Alternative Speichermedien sind definitiv notwendig, da die bisher bekannten in absehbarer Zeit an ihre physikalischen Grenzen stoßen werden und auch Möglichkeiten nicht erfüllen können, die bei den neuen Medien von grundauf gegeben sind.

Von den biologischen und physikalischen Möglichkeiten haben wir ja nun einen Ausschnitt betrachtet und gesehen, dass diese durchaus zukunftssträftig sind, wenn sie so genutzt werden, wie die Forscher es sich bisher zumindest theoretisch denken. Die verschiedenen Schwerpunkte die die Unterschiedlichen Medien haben sind aufgrund ihrer Art gegeben, z.b. besondere Kopiersicherheit oder niedriger Energieverbrauch.

Allerdings bis alles so funktioniert wie es am optimalsten wäre, bedarf es noch einiger Forschung und Entwicklung und ob es dann auch im letzten Detail so funktioniert und realisierbar ist wie es sich die Forscher vorstellen, bleibt nach wie vor im Dunkeln.

Quellen

Bücher

- Nelson, Cox „Lehninger Biochemie“ 3. Auflage
2001, Springer-Verlag
- Gerthsen „Physik“ 23. Auflage 2006 Springer-Verlag

Paper

- M.N. Kozicki, C. Gopalan, M. Balakrishnan, M. Park, and M. Mitkova, “Non-Volatile Memory Based on Solid Electrolytes,”
Proceedings of the 2004 Non-Volatile Memory Technology Symposium, 10-17 (2004).
- E. Spanier, A. M. Kolpak, J. J. Urban, I. Grinberg, W. S. Yun, L. Ouyang, A. M. Rappe and H. Park “Ferroelectric Phase Transitions in Individual Single-Crystalline BaTiO₃ Nanowires,” J, Nano Lett. 6 735-739 (2006)
- W. S. Yun, J. J. Urban, Q. Gu and H. Park “Ferroelectric Properties of Individual Barium Titanate Nanowires Investigated by Scanned Probe Microscopy,” Nano Lett. 2, 447-450 (2002)
- T. Fischer, N. Hampp
Two-Photon-Absorption of Bacteriorhodopsin: Formation of a red-shifted thermally stable photoproduct F620.
Biophys. J., 89 (2005) 1175-1182.
- N. Hampp, C. Bräuchle, D. Oesterhelt
Bacteriorhodopsin Wildtype and Variant Aspartate-96 → Asparagine as Reversible Holographic Media.
Biophys. J. 58 (1990) 83-93.
- N. Hampp
Bacteriorhodopsin as a Photochromic Retinal Protein for Optical Memories.
Chem. Rev., 100 (2000) 1755-1776
- Levin-Zaidman, Smadar Englander, Joseph Shimoni, Eyal Sharma, Ajay K. Minton, Kenneth W. Minsky, Abraham „Ringlike Structure of the Deinococcus radiodurans Genome: A Key to Radioresistance?“ Science; 1/10/2003, Vol. 299 Issue 5604, p254, 3p, 2 bw
- Pak Chung Wong, Kwong Kwok Wong, and Harlan Foote, “Organic Data Memory Using the DNA Approach,”
Communications of the ACM, Vol. 46, No. 1, Jan 2003. 44/46

Quellen

Webseiten

- http://www.usuhs.mil/pat/deinococcus/index_20.htm
- http://www.zeit.de/2003/09/DNA-Text_10
- <http://www.netzeitung.de/servlets/page?section=984&item=222111>
- http://www.welt.de/print-welt/article332853/Bakterien_als_atomsichere_Datenspeicher.html
- <http://www.heise.de/newsticker/Mini-Speicher-funktioniert-mit-Wasser--/meldung/72561>
- <http://www.icmm.csic.es/gf2/tecnicas/ferroelectric.pdf>
- http://www.innovations-report.de/html/berichte/physik_astronomie/bericht-37235.html
- <http://www.infoniac.com/hi-tech/flash-memory-will-soon-become-obsolete.html>
- http://www.wired.com/gadgets/miscellaneous/news/2007/10/ion_memory#
- <http://www.astro.lsa.umich.edu/~cowley/ionsize.html>
- <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=/iel5/10330/32893/01541405.pdf?arnumber=1541405>
- http://findarticles.com/p/articles/mi_m0EIN/is_2002_Jan_18/ai_81898511
- <http://www.design-reuse.com/news/8739/axon-infineon-licensee-programmable-metallization-cell-nonvolatile-memory-technology.html>

Quellen

Webseiten

- <http://axontc.com/images/Nov04NVMTSpaper.pdf>
- <http://www.mram-memory.eu/revolutioniert-pmc-programmable-metallization-cell-die-speicherindustrie>
- http://en.wikipedia.org/wiki/Programmable_metallization_cell

Bilder

Die Bilder wurden den angegebenen Webseiten sowie Papern entnommen