



# Materie im elektrischen Feld

Christian Fremerey, WS 08/09

## Gliederung

1	Beschreibung .....	1
1.1	Polarisation.....	1
1.2	Dipolmoment .....	2
2	Ferroelektrika .....	2
3	Ferroelektrische Kondensatoren .....	5

**Einstieg:** Stellen wir uns mal vor, wir gehen aus einer x-beliebigen Vorlesung und setzen uns gemeinsam an einen Tisch. Dort klappen wir die Laptops auf, drücken den Anschalter und können direkt, ohne hochzufahren, anfangen zu arbeiten. Möglich? Dieser Vortrag stellt eine neue Stoff-Klasse vor, welche mittlerweile so gut erforscht ist, dass man diese Eigenschaft erreichen könnte. Diese Materialien erfüllen auch den Wunsch, dass die neue Generation an Foto-Handys, MP3 Player / iPods, Navigationssystemen oder Notebooks immer kleiner, handlicher und schneller wird, dabei aber möglichst viel Speicherplatz haben soll.

Die heutigen Speicher-Medien stoßen langsam an ihre natürlichen Grenzen und dadurch wird man ihre Leistung in naher Zukunft nicht weiter erhöhen können. Neuartige Arbeitsspeicher brächten der Elektronik neue Möglichkeiten. Ferroelektrika hätten solche neuen Möglichkeiten und können somit die Speicher-Medien der Zukunft sein.

## 1 Beschreibung

Zunächst sollen einige Begriffe erläutert werden. Diese betreffen das Thema Materie im elektrischen Feld und sind Basis für das Verstehen von Ferroelektrika.

### 1.1 Polarisation

Jede Materie, auch elektrisch neutrale, besteht aus geladenen Teilchen (Atom-Kern und Elektronen). In einem elektrischen Feld wirken Kräfte auf diese Teilchen, welche sie verschieben können. Sobald die Moleküle einer Materie in ein elektrisches Feld kommen, werden positiver und negativer Ladungsschwerpunkt verschoben. Dies nennt man auch Polarisation.

Die Polarisierbarkeit ist ein Maß für die Verschiebbarkeit von der positiven zur negativen Ladung, durch ein äußeres elektrisches Feld.

Wenn die Materie im elektrischen Feld polarisiert wird, werden die leichter beweglichen Elektronen-Hüllen auf die positive Seite gezogen. Beim Abschalten des Feldes verschwindet der Dipol und die Ladungsschwerpunkte fallen wieder in einem Punkt zusammen. Der beschriebene Effekt wird auch Verschiebungspolarisation (**a**) genannt. Diese Art von Polarisation ist immer und somit auch in allen Aggregat-Zuständen wirksam.

Ein andere Effekt tritt auf, wenn permanente Dipole vorliegen. Diese werden, wenn ein elektrisches Feld auf sie einwirkt, alle gleich ausgerichtet. Dadurch heißt diese Art der Polarisation auch Orientierungspolarisation (**b**).

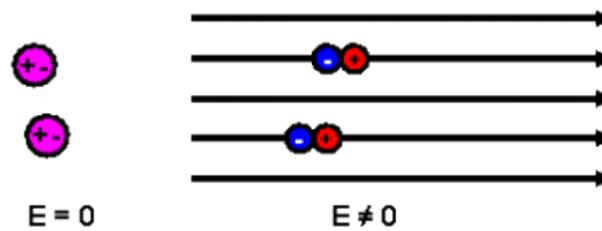


Abb. 1: Verschiebungspolarisation (a) [2]

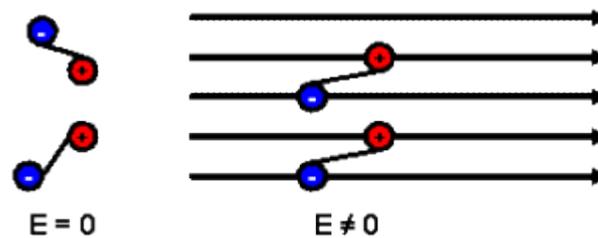


Abb. 2: Orientierungspolarisation (b) [2]

## 1.2 Dipolmoment

Durch das elektrische Feld und den Effekt der Polarisation kann ein Dipolmoment induziert werden. Denn durch die Ladungsschwerpunktsverschiebung werden Dipole induziert. Der physikalische Zusammenhang ist dabei:

$$p = \alpha \cdot E$$

$p$  = Dipolmoment  
 $\alpha$  = Polarisierbarkeit  
 $E$  = elektrisches Feld

Das Dipolmoment ist ein Maß für die räumliche Ladungstrennung und beschreibt den Dipol. Die Definition eines Dipols ist, dass der positive und der negative Ladungsschwerpunkt nicht aufeinander fallen.

## 2 Ferroelektrika

Die Ferroelektrizität war früher auch bekannt als die Seignettesalz-Elektrizität, da diese Eigenschaft am Seignette-Salz als erstes entdeckt wurde. Ferroelektrika sind kristalline und somit feste Materialien. Die kristalline Symmetrie des Materials muss eine polare Achse zulassen. Die bekanntesten Ferroelektrika sind Ionenkristalle mit Perowskit-Struktur. Als Beispiele gelten:

Blei-Zirkonat-Titanat,  $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$  (Abkürzung PZT) und Bariumtitanat  $BaTiO_3$  (Abkürzung: BTO).

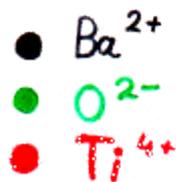
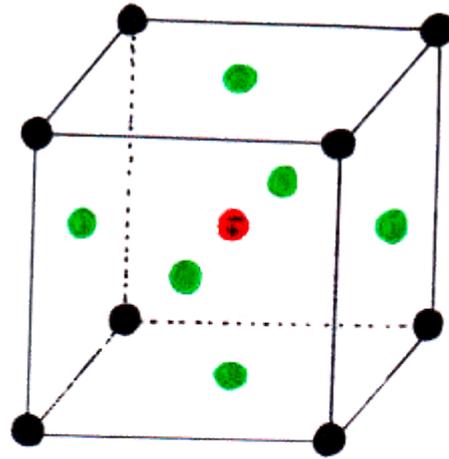


Abb. 3: Perowskit-Kristallstruktur [7]

Die positiven Ti-Ionen verschieben sich im Kristallgitter relativ zu den anderen Atomen. Dadurch kommt es zu einer spontanen Polarisierung und somit zu einem dauerhaften elektrischen Feld im Kristall. Dabei kann sich das Ti-Ion in jede Richtung, um den Kristallmittelpunkt bewegen. Somit gibt es viele verschiedene Polarisationsausrichtungen. Ferroelektrische Stoffe besitzen ein elektrisches Dipolmoment ohne Anlegen eines äußeren elektrischen Feldes.

**Ferroelektrizität beschreibt das Phänomen, dass Stoffe mit einem elektrischen Dipolmoment durch das Anlegen eines äußeren elektrischen Feldes die Richtung der spontanen Polarisierung ändern können.**

Abb. 4: Definition der Ferroelektrizität [6]

Bisher konnte Ferroelektrizität am besten mit PZT und dessen Mischkristallen ausgenutzt werden. Da Blei aber giftig ist, wird es in Kürze in der EU verboten sein. Man muss sich anderer Stoffe bedienen. BTO ist dabei zweite Wahl, denn es besitzt eine geringere Ferroelektrizität als PZT und verliert bei relativ niedrigen Temperaturen seine spontane Polarisierung. Denn die Polarisierung bei Ferroelektrika ist temperaturabhängig. Oberhalb einer bestimmten Temperatur, der Curie-Temperatur, verschwindet die spontane Polarisierung. Das Material wird dann paraelektrisch. Das bedeutet, dass alle vorhandenen permanenten Dipole beim Anlegen eines äußeren elektrischen Feldes gleich ausgerichtet werden. Zum Vergleich: Hier läge der gleiche Zustand wie bei der Orientierungspolarisation vor.

**Experiment:** Durch einen aufgeladenen Plastik-Stab wird ein Wasserstrahl abgelenkt

**Material:**

- Plastik-Stab
- Fell/Tuch
- Bürette
- Stativ, Büretten-Klemme
- Becherglas, 1000 mL
- Leitungswasser

**Durchführung:** In die Bürette füllt man Leitungswasser ein. Unter die Bürette kommt das Becherglas, damit das durchlaufende Wasser wieder aufgefangen wird. Dann dreht man die Bürette auf und nimmt das Fell/Tuch und den Plastikstab in die Hand. Durch schnelles Reiben des Plastikstabes im Fell/Tuch lädt sich der Plastikstab auf. Mit diesem geht man dann in die Nähe des Wasserstrahls.

**Beobachtung:** Der Wasserstrahl „biegt“ sich vom Stab weg.

**Erklärung:** Wasser besteht aus permanenten Dipolen, welche durch das elektrische Feld des aufgeladenen Plastikstab in eine Richtung orientiert werden. Die Moleküle erfahren also eine Orientierungspolarisation.

Unterhalb der Curie-Temperatur wird das Material ferroelektrisch und besitzt wieder die ursprüngliche spontane Polarisation. Die Curie-Temperaturen für die beiden vorgestellten Materialien sind:

BTO:  $T_c = 393 \text{ K}$

PZT:  $T_c = 763 \text{ K}$

Wie eben erwähnt besitzen Ferroelektrika in ihren kleinsten Bauteilen permanente elektrische Dipole. Ferroelektrika bilden Domänen. Dies sind Bereiche von gleicher Polarisationsausrichtung. Dabei ändert sich die Polarisationsrichtung von Domäne zu Domäne. Die Domänen oder auch die entstehenden Dipolbereiche lassen sich unterhalb der Curie-Temperatur gezielt durch ein elektrisches Feld umpolen.

Hier kann ein Verweis auf die Definition über Ferroelektrizität erfolgen.

Bei der Umpolung stehen die spontane Polarisierung und das äußere elektrische Feld im Zusammenhang durch eine Hysterese-Kurve:

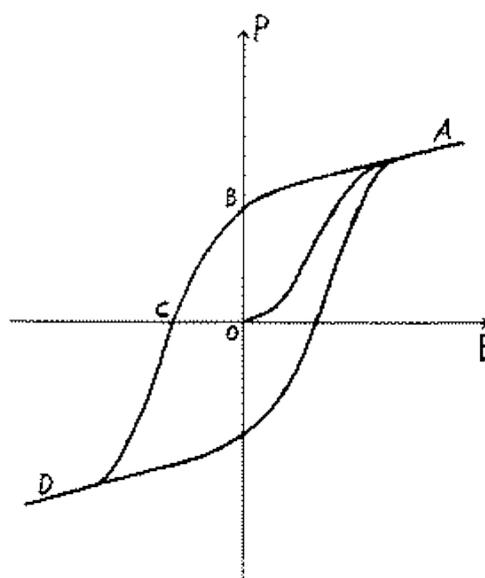


Abb. 5: Hysterese-Kurve [7]

Am Punkt 0 sind genauso viele Domänen in positiver wie in negativer Richtung orientiert. Die Gesamt-Polarisation des Kristalls ist also gleich null. Legt man nun ein positives elektrisches Feld an, klappen die negativen Domänen langsam zu positiven um. Wird das äußere elektrische Feld weiter erhöht, sind bald alle Dipole in eine Richtung orientiert. Dies ist am Punkt A der Fall. Die Hysterese-Kurve geht hier in eine Sättigung über. Im ganzen Kristall existiert nur noch eine einzige Domäne. (Hier in positiver Ausrichtung) Senkt man nun die Feldstärke wieder bis auf null, so bleibt eine Rest-Polarisation übrig. Dies wird im Punkt B deutlich. Es liegt ein Überschuss von Domänen in positiver Richtung orientiert vor. Man spricht auch von einer Remanenz-Polarisation  $P_r$ . Wird nun ein negatives elektrisches Feld angelegt, dann klappen die Domänen allmählich in die negative Ausrichtung um. Am Punkt C besitzt die eine Hälfte der Domänen eine positive und die andere eine negative Richtung. Das elektrische Feld, welches dafür benötigt wird, nennt man Koerzitivfeld  $E_k$ . Erhöht man das negative elektrische Feld weiter, dann kommt es zu einer Ausrichtung aller Domänen in negative Richtung. Am Punkt D tritt erneut eine Sättigung auf.

Die Hysterese-Kurve kann von ferroelektrischen Materialien immer wieder in hoher Geschwindigkeit durchlaufen werden. Denn die unterschiedlich orientierten Domänen liegen in einem Bereich von wenigen Atomlagen nebeneinander. Dadurch sind die ferroelektrischen Domänen nur einige wenige Nanometer breit (zwischen 1 und 10 nm). Aufgrund der schmalen Domänenwände kann so eine hohe Dichte von Domänen in ferroelektrischen Dünnschichten auftreten. Bei unseren heutigen Speichermedien (meist aus Ferromagnetika) ändert sich die Orientierung der Magnetisierung über einen Bereich von ca. 10 nm. Wenn man sich nun klar macht, dass durch die Domänen und deren Umpolung die Daten gespeichert werden, dann ergibt sich schnell folgendes Bild. Bei der Entwicklung von ferroelektrischen Speichermedien könnte man eine höhere maximale Informationsdichte auf kleinerem Raum schaffen als bei ferromagnetischen. Denn durch den geringen Abstand der Domänen kann die Umpolung sehr schnell durchgeführt werden. Mit dieser Stoffeigenschaft wäre es möglich, dass mit Daten, die auf diesen Speichermedien gespeichert werden, schneller gearbeitet werden kann als auf jetzigen Speichermedien. Aufgrund dieser neuen Erkenntnisse sind ferroelektrische Materialien die Wunschkandidaten für Speicherelemente (auch RAM genannt). Von diesen neuen ferroelektrischen Speichern (FeRAM) gibt es zwar noch wenige, doch das wird sich aber aller Voraussicht bald ändern.

Speicherelemente aus diesen Stoffen können durch deren Eigenschaften, Daten permanent speichern wie eine Festplatte, aber mit ihnen so schnell arbeiten wie ein Arbeitsspeicher.

Sich an einen Rechner zu setzen ihn anzuschalten und sofort loszuarbeiten, ohne die Bill Gates Gedenkminute des Hochfahrens abzuwarten, scheint nur noch eine Frage der Zeit zu sein. Genauso steht einem Wunsch nach immer schnelleren, kleineren und leistungsfähigeren elektronischen Geräten jeder Art anscheinend nichts mehr im Wege.

### **3 Ferroelektrische Kondensatoren**

Eine Weiterentwicklung neuer Speichermedien ist unablässig. Ein Beispiel aus der aktuellen Forschung mit Ferroelektrika kommt vom Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik in Halle.

Dort hat eine deutsch-koreanische Arbeitsgruppe vor kurzem (Bericht vom 17.06.2008) einen neuen Speicher-Weltrekord in der Materialklasse der Ferroelektrika aufgestellt. Sie schafften es 176 Milliarden Nano-Kondensatoren auf einem Quadratzoll (1 Zoll= 6,45 cm) zu platzieren.

Als Erinnerung: Kondensatoren sind zum Speichern von elektrischer Ladung da und speichern damit zusammenhängend Energie. (Vorangegangen war ein Vortrag über Kondensatoren. Damit zusammenhängend wurde der Aufbau eines Plattenkondensators erläutert.)

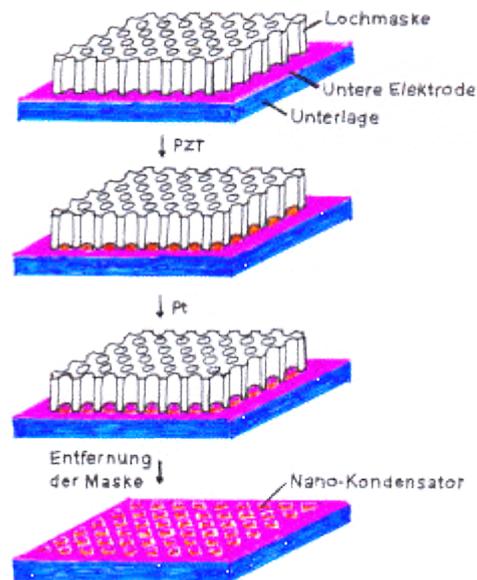


Abb. 6: Bau der Nano-Kondensatoren [3]

Der Kondensatoren-Bau des Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik in Halle: Durch eine nur rund 100 nm dünne Schablone aus Aluminiumoxid (Lochmaske) lässt das deutsch-koreanische Forscherteam erst Bestandteile der Keramik (PZT) auf eine Platinschicht (Pt) rieseln. Anschließend scheidet die Wissenschaftler noch ein wenig Pt ab, um einen elektrischen Kontakt zur Keramik herzustellen und fertig sind die Kondensatoren.

Umgerechnet konnten die Forscher durch diese Nano-Kondensatoren mehr als 3 Gigabyte/cm<sup>2</sup> speichern. Dies ist im Vergleich zu unsere heutigen Speichermedien zwar noch recht wenig, diese fassen ca. 23 Gigabyte pro Quadratcentimeter, jedoch dürften diese Materialien damit ihre maximale Speicherdichte erreicht haben. Die neue Terabyte - Festplatte besitzt eigentlich in ihrem Gehäuse 4 Platten die jeweils 250 Gigabyte speichern. Es sind höhere Speicherdichten die Voraussetzung, dass diese Speichermedien eine breitere Anwendung finden.

**Zusammenfassung.** Ferroelektrika besitzen mehrere Vorteile:

1. Ihre Entwicklung steht gerade erst am Anfang.
2. Forscher sagen voraus, dass man sich jetzt schon Speicherdichten von ca. 20-25 Gigabyte/cm<sup>2</sup> annähern kann.
3. Es wird möglich sein, mit Daten, welche auf ferromagnetischen Materialien gespeichert sind, schneller zu arbeiten als bei z. B. ferromagnetischen.

Gleichzeitig ist die Speicherung der Daten permanent und sie können nicht wie bei ferromagnetischen Speichern, z. B. durch einen externen Magneten zerstört werden.

**Abschluss.** Dass die Erforschung neuer Speichermedien ein wichtiges Forschungsgebiet ist, sieht man auch an der Universität Bayreuth. Dort hat man an anderen Materialien geforscht und deren Speicherkapazität untersucht. So hat die Arbeitsgruppe von Prof. Dr. A. Böker, im Jahre 2005, im Rahmen einer internationalen Zusammenarbeit mit der Uni-

*versity of Massachusetts ein Verfahren entwickelt, Speichermedien aus Zweikomponentenkunststoff mit Informationsdichte von 90 GB/cm<sup>2</sup> herzustellen. Dadurch war es möglich Daten von 80 Standard-DVD's auf eine Fläche einer 1 Euro-Münze zu speichern.*

#### **Quellen:**

1. Stöcker – Taschenbuch der Physik - Verlag Harri Deutsch AG, 2002
2. Ekbert Hering, Rolf Martin, Martin Stohrer – Physik für Ingenieure 10. Auflage -Springer Verlag – Heidelberg – Berlin, 2007
3. scinexx – Das Wissensmagazin, Springer-Verlag, Heidelberg, Zwergenspeicher mit Riesendichte, MPG, 17.06.2008
4. scinexx – Das Wissensmagazin, Springer-Verlag, Heidelberg, „Kristalle – Verspannung erwünscht“, Forschungsbund Berlin, 08.11.2004
5. Ralf Kories, Heinz Schmidt-Walter: Taschenbuch der Elektrotechnik, Verlag Harri Deutsch, 2004
6. David R. Lide: CRC Handbook of Chemistry and Physics: 87th Edition: 2006 – 2007, 87th ed. Auflage. B&T, 2006
7. [http://www.uni-tuebingen.de/uni/pki/skripten\\_krist\\_1/VK1\\_Struktur\\_Physik\\_0304.pdf](http://www.uni-tuebingen.de/uni/pki/skripten_krist_1/VK1_Struktur_Physik_0304.pdf), 25.10.2008 (Quelle verschollen, 30.09.2020)