Spintronics

Christian Caspers

Betreuer
Dr. Christian Schüßler-Langeheine
II. Physikalisches Institut an der Universität zu Köln

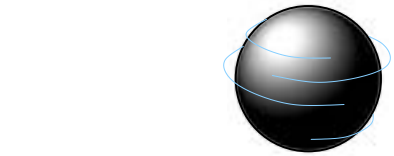
Oberseminar 2. Juli 2007

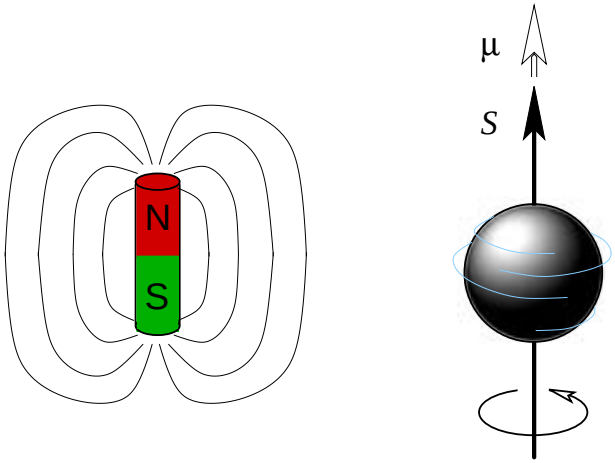
Inhaltsübersicht

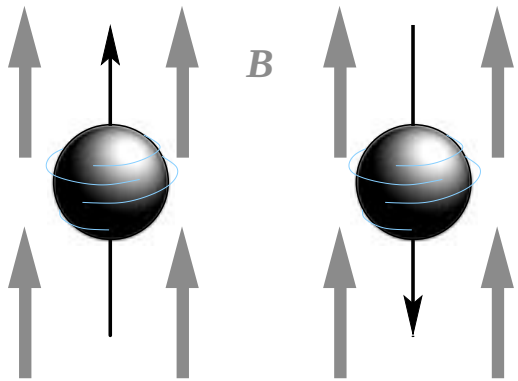
1. Was sind Spintronics?
   - Der Spinfreiheitsgrad von Elektronen
   - Klassische Spintronics
2. Der Spintransistor nach Datta und Das
3. Erzeugung spinpolarisierter Elektronen
4. Spinmanipulation und -transport

Was sind Spintronics?

Der Spinfreiheitsgrad von Elektronen





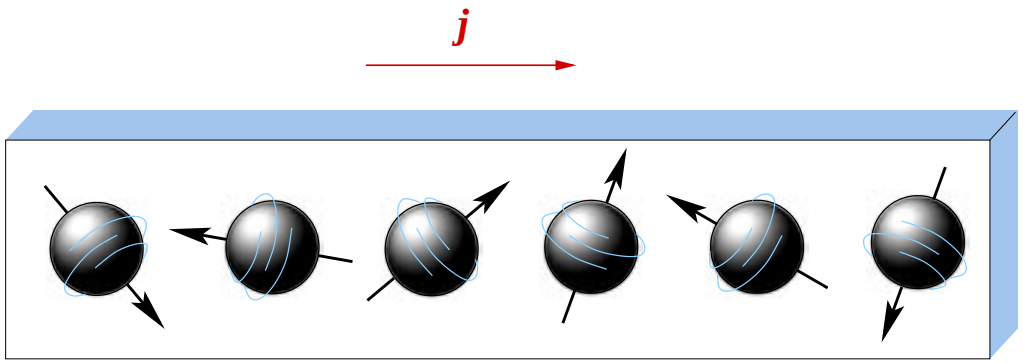


Elektron besitzt Masse, Ladung und inneren Freiheitsgrad, den Spin

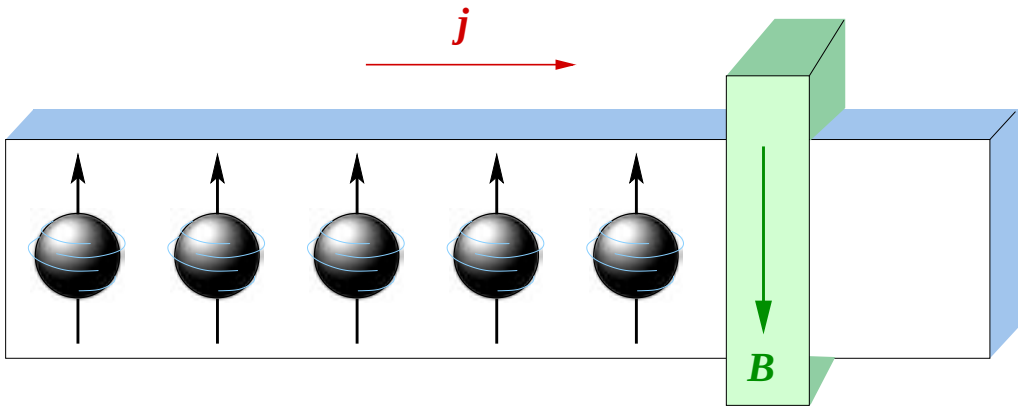
Spin S $\Rightarrow$ winziges magnetisches Moment μ

Im Magnetfeld haben $|\uparrow\rangle$ und $|\downarrow\rangle$ unterschiedliche Energien

Prinzip der Spintronics

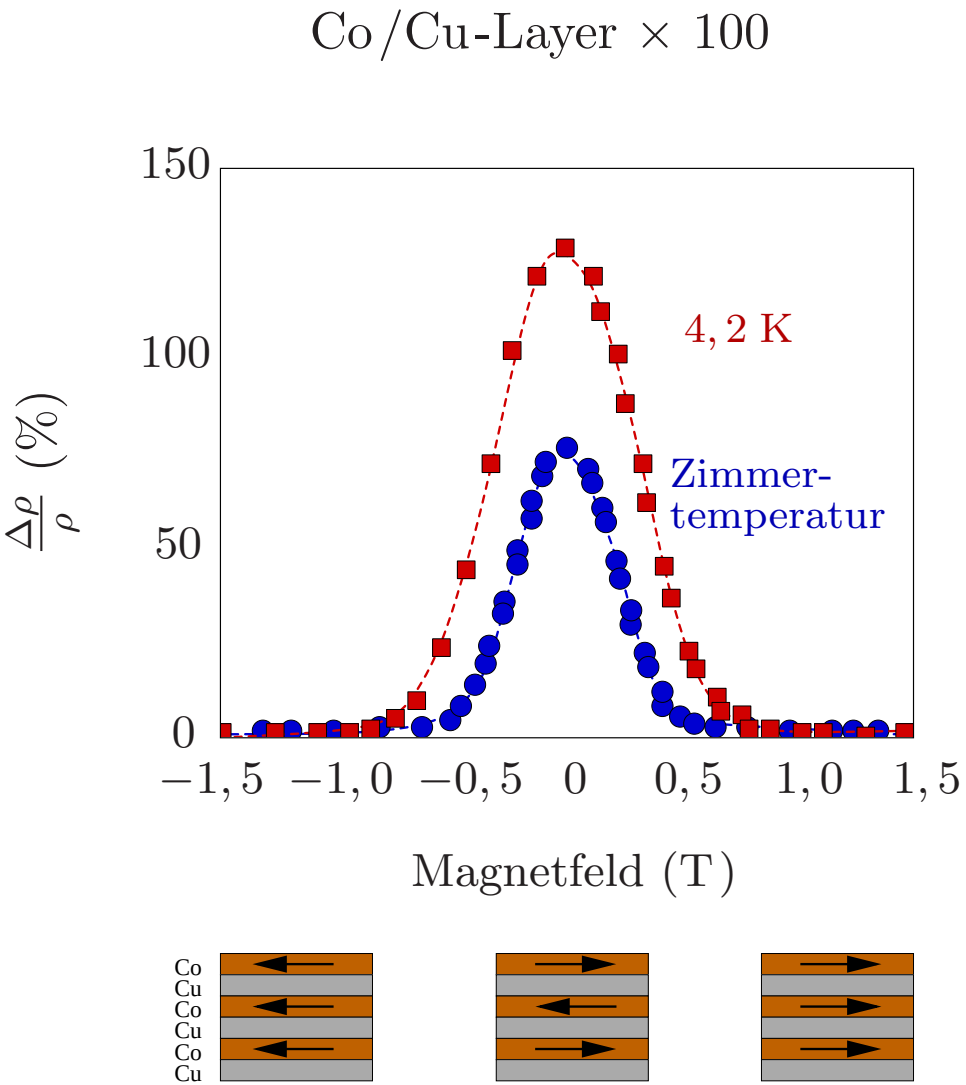


Herkömmliche elektrische Schaltung: Elektronik



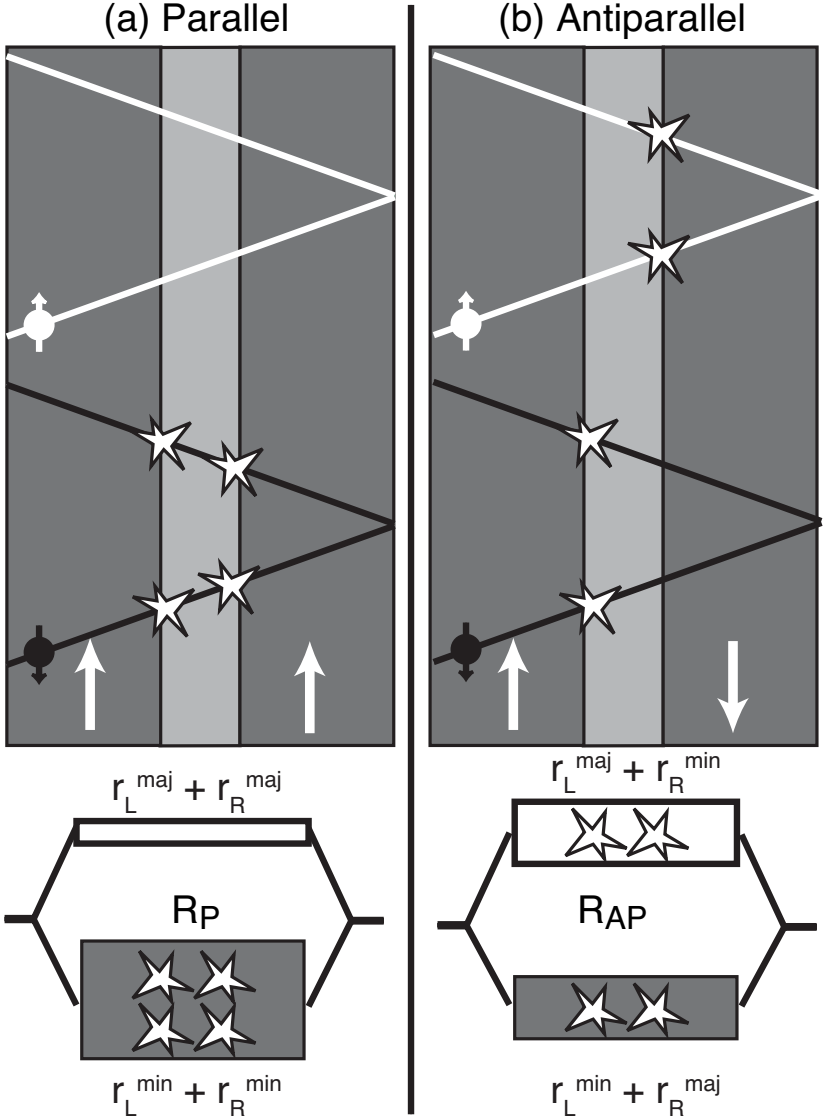
Spinabhängiger Stromfluss: Spintronics.

Giant Magneto-Resistivity (GMR)



- Abhängig vom äußeren Magnetfeld $\rightsquigarrow$ unterschiedliche Widerstände
- *GMR* ermöglicht das *elektrische Auslesen kleiner statischer Magnetfelder*

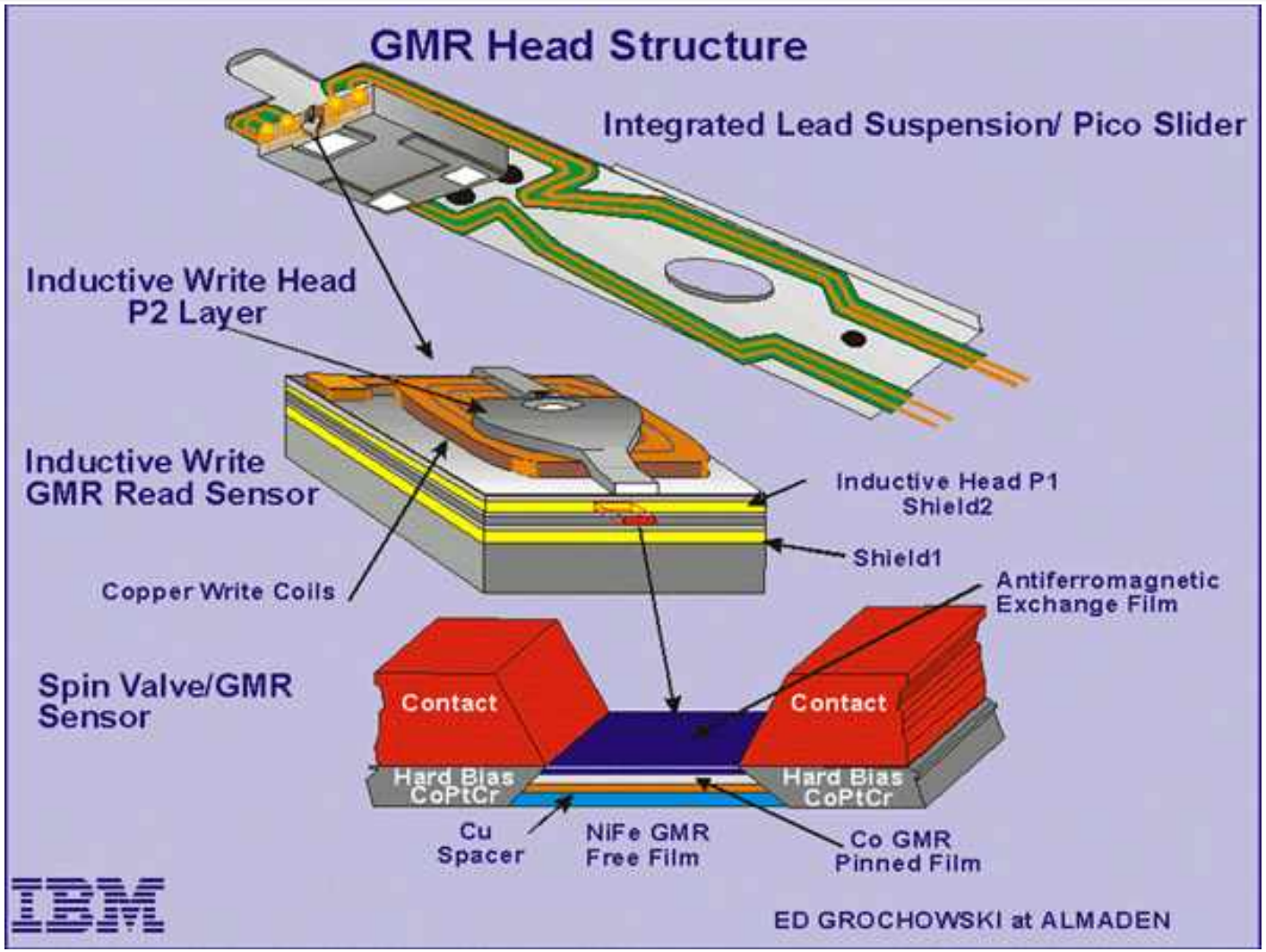
GMR: Spinabhängige Streuung



- Elektrischer Widerstand:
  klein $\Longleftrightarrow$ **S** $\parallel$ **M**
  groß $\Longleftrightarrow$ **S** $\uparrow\downarrow$ **M**

- FM-Schichten im Sensor:
  1 mit fester Magnetisierung (*gepinnt*),
  min. 1 mit freier Magnetisierung
  (*magn. weich*)

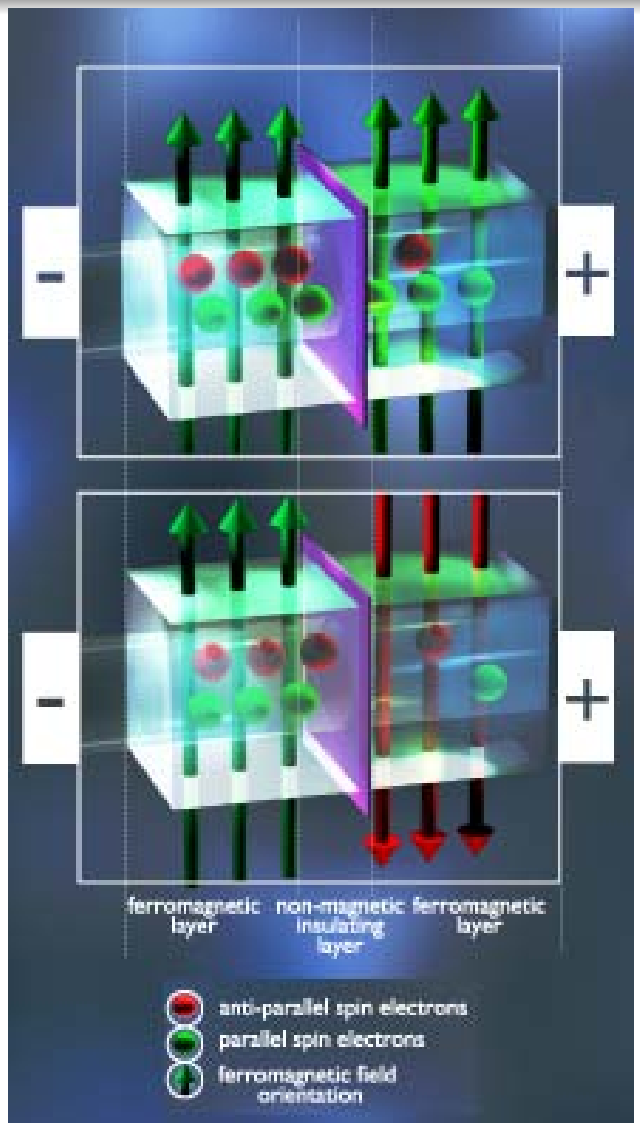
GMR-Anwendung: Leseköpfe für Festplatten



Animation „Lesekopf“ normal

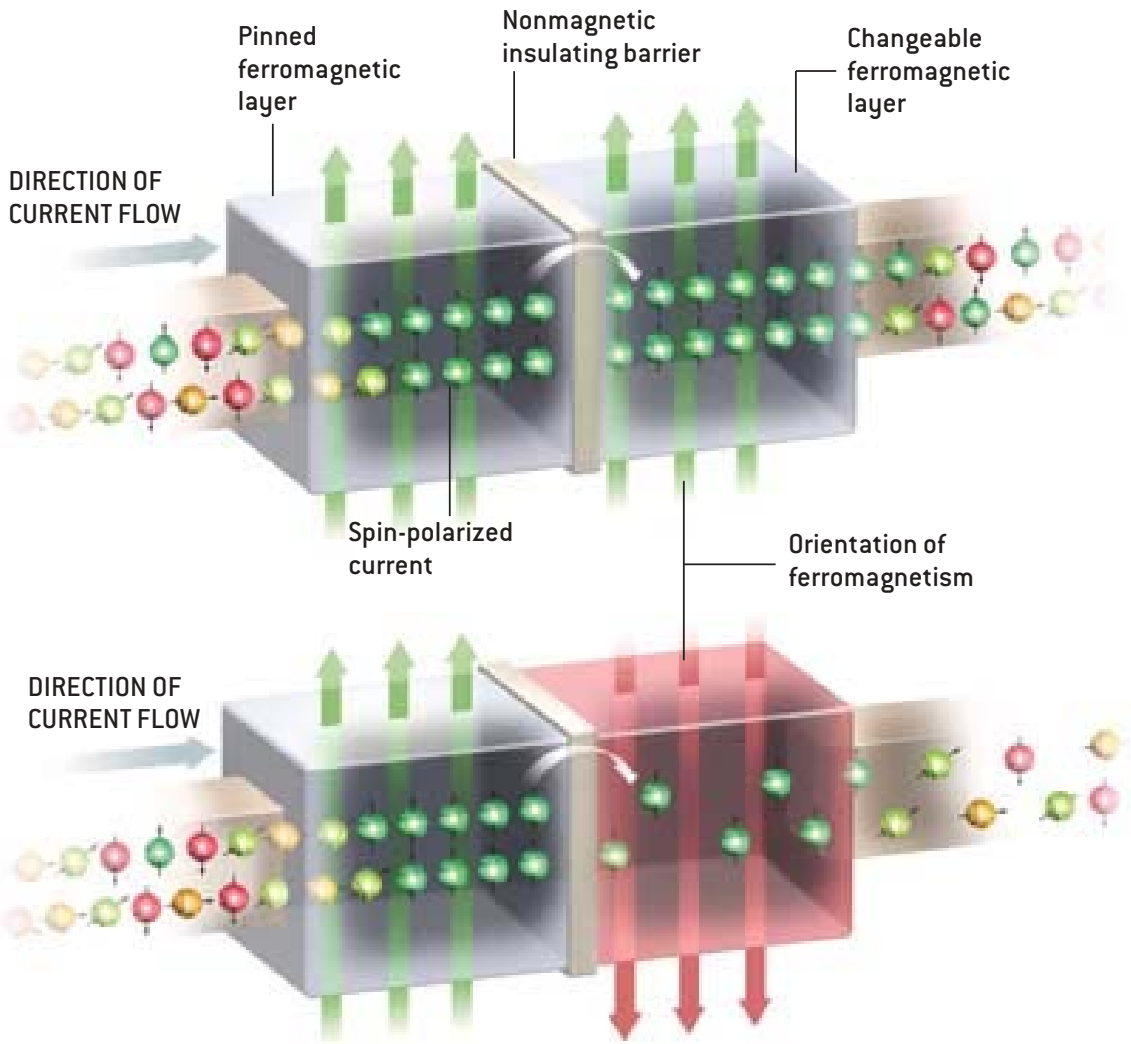
Animation „Lesekopf“ advanced

Tunnel Magneto-Resistivity (TMR)



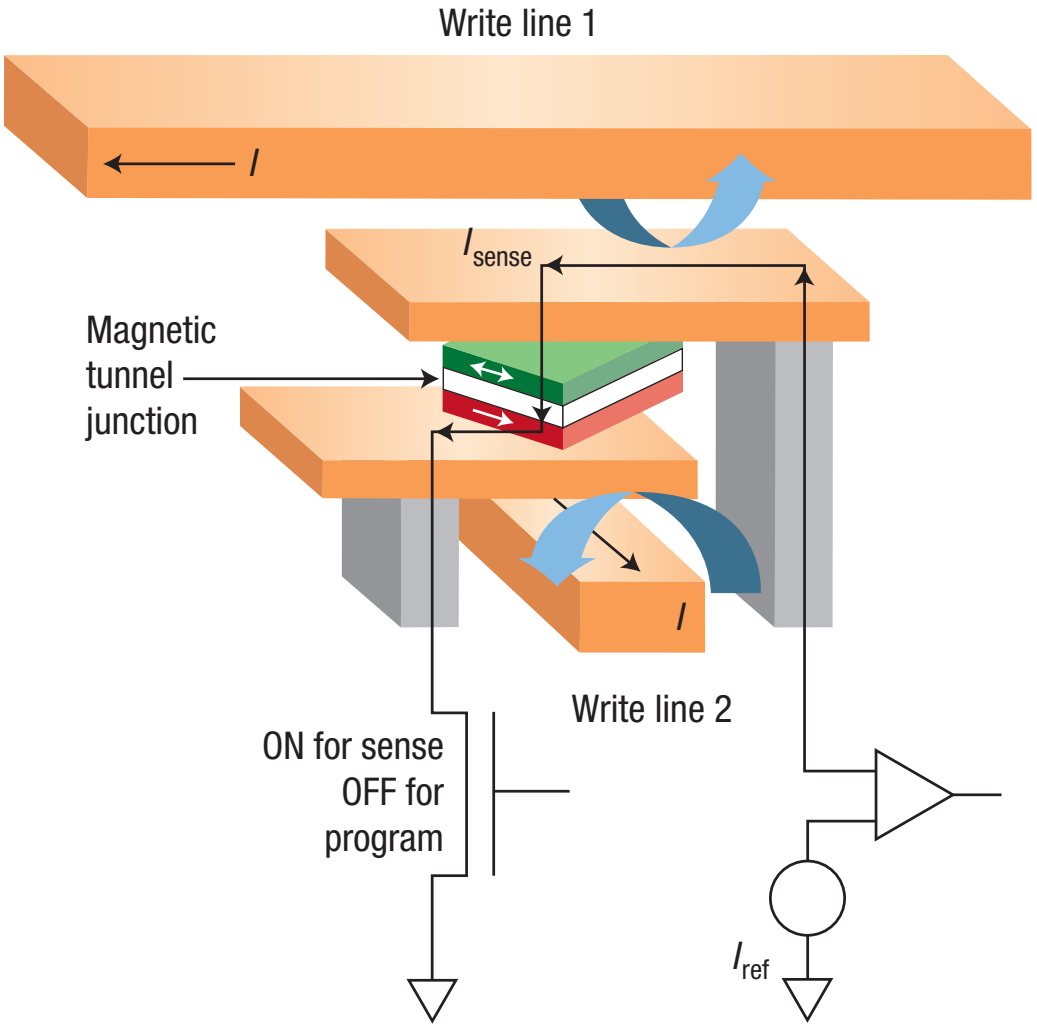
- 2 FM-Schichten um dünne Isolationsschicht (*magnetic tunnel junction, MTJ*)
- Eine FM-Schicht gepinnt (magn. hart), die andere von außen magnetisierbar (magn. weich)
- Tunnelstrom abhängig von Orientierung der Magnetisierungen in den FM-Schichten
  $\Rightarrow$ Elektrischer Widerstand abhängig von äußerem Magnetfeld
  $\Rightarrow$ Magnetfeldsensor; magn. Speicherzellen...

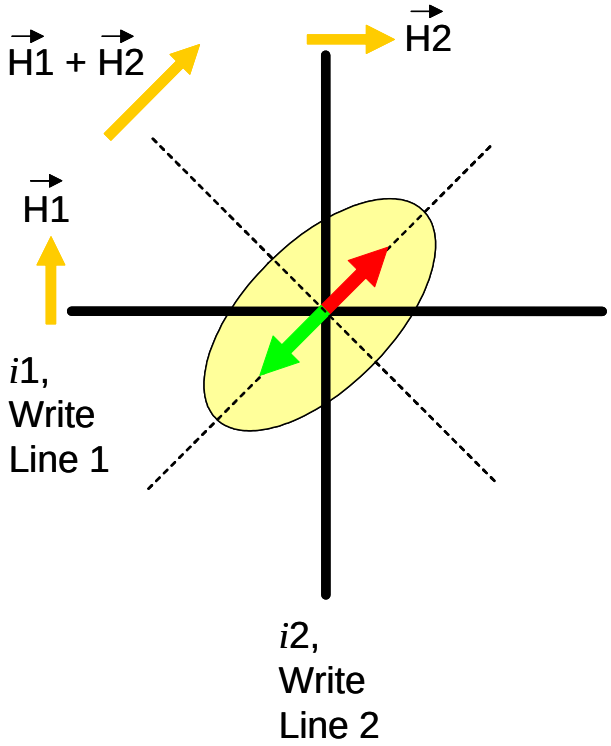
Anwendung: Nichtflüchtiger Massenspeicher MRAM



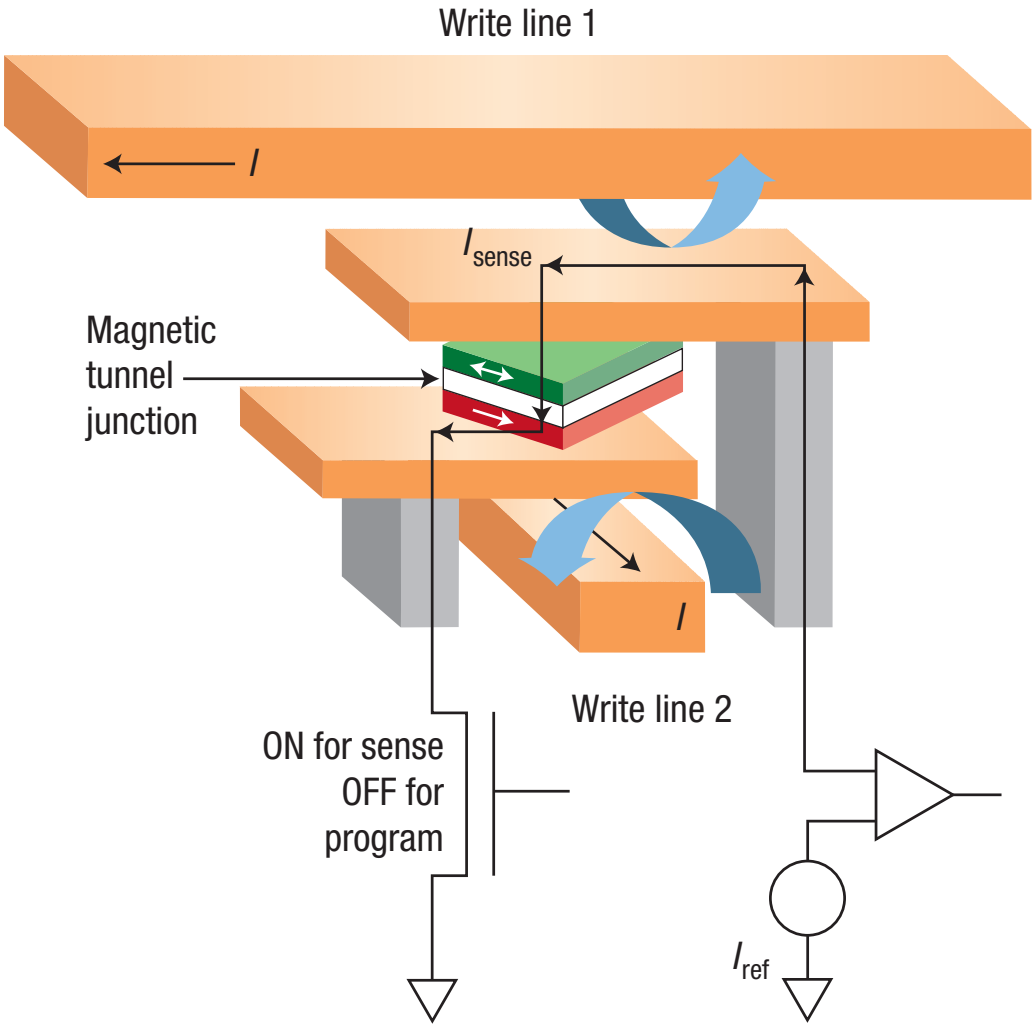
- MRAMS speichern Daten in *magnetic tunnel junctions (MTJ)*.
- Die Stellungen der Magnetisierungen (parallel oder antiparallel) stellen die Information von 1 Bit dar

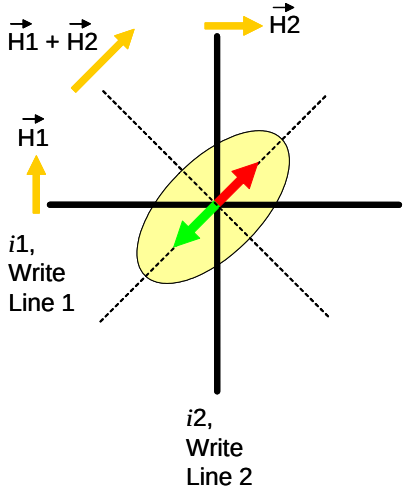
MRAM – Lesen und Schreiben der Daten

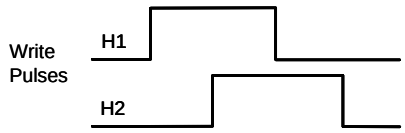




MRAM – Lesen und Schreiben der Daten

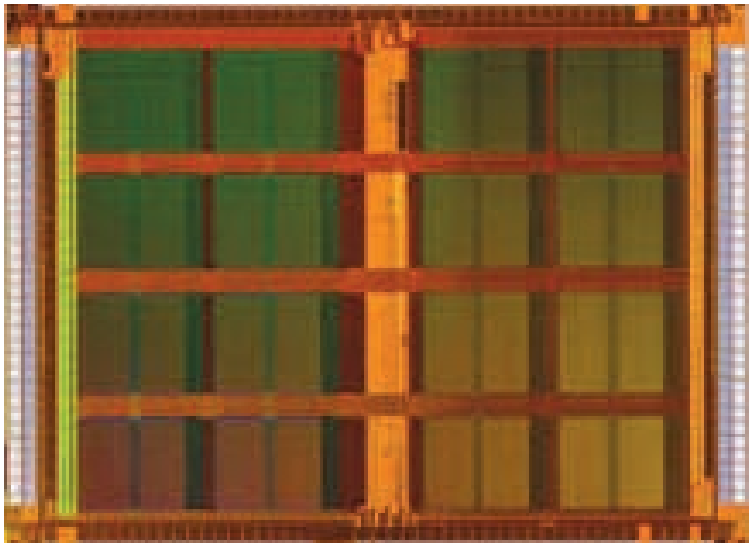






- 2-Phasen-Programmierimpuls, um die freie FM-Schicht um $180°$ zu rotieren
- Wechsel des Bits unabhängig von dem existierenden Zustand
- Ein Pre-Read erfasst, ob ein Schreibprozess nötig ist

MRAM-Chips

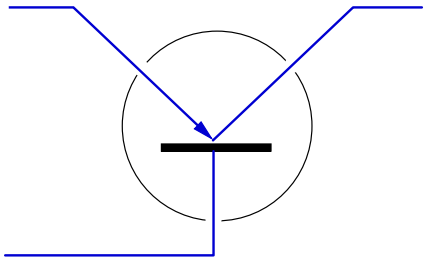


256 kbit-Chip (Freescale Sc., 2006)

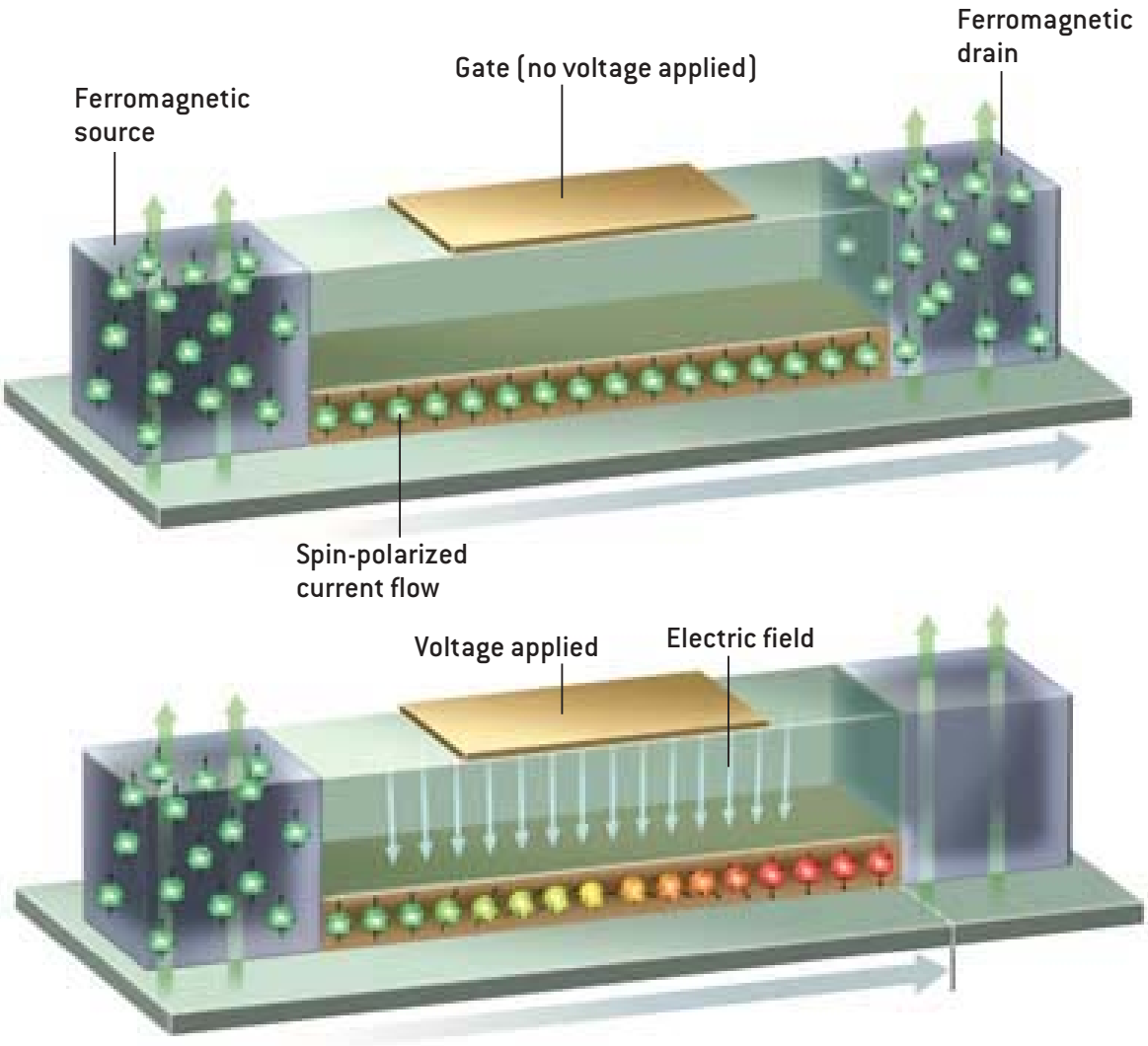
Prinzip

- MRAMS speichern Daten dauerhaft magnetisch
- Schreiben durch induziertes Magnetfeld, Lesen durch Spinströme

Der Spintransistor nach Datta und Das



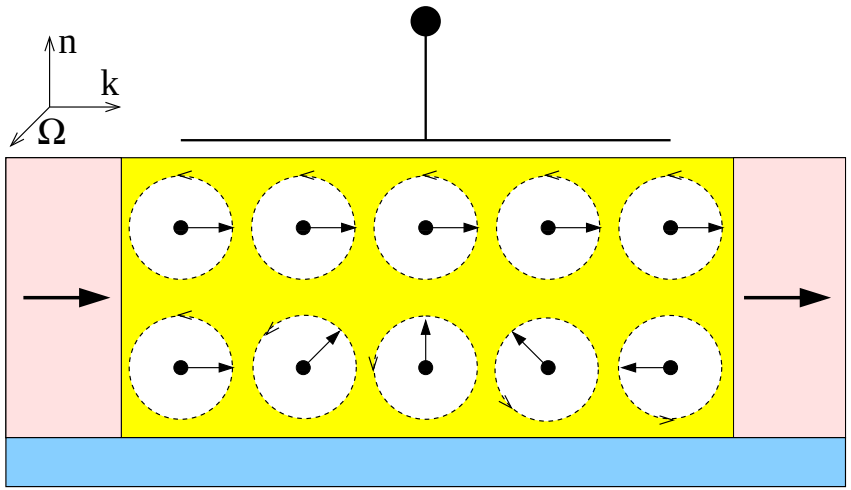
Der Spintransistor (*SFET*) nach Datta und Das



SFET: Schalten von Spinströmen

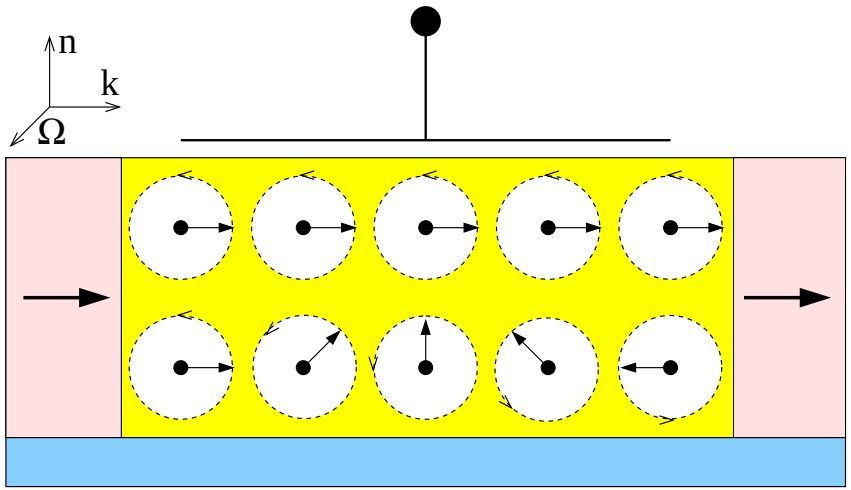
Schmaler Gate-Kanal (Halbleiter) zwischen Source und Drain (FM)

Schaltprinzip im Datta-Das-Spintransistor



- Source und Drain: Parallele (oder antiparallele) Magnetisierung
- Ballistischer Transport spinpolarisierter Elektronen (**k**) im Gate-Kanal
- Kontrolle der Spinpräzession (Gatespannung, Material)

Schaltprinzip im Datta-Das-Spintransistor

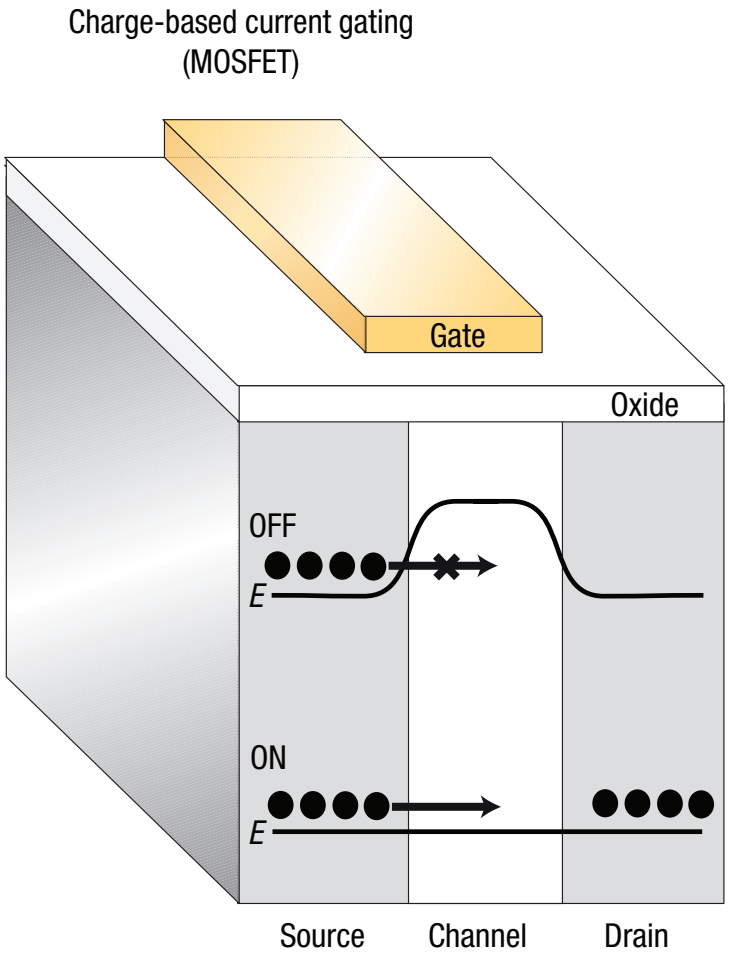


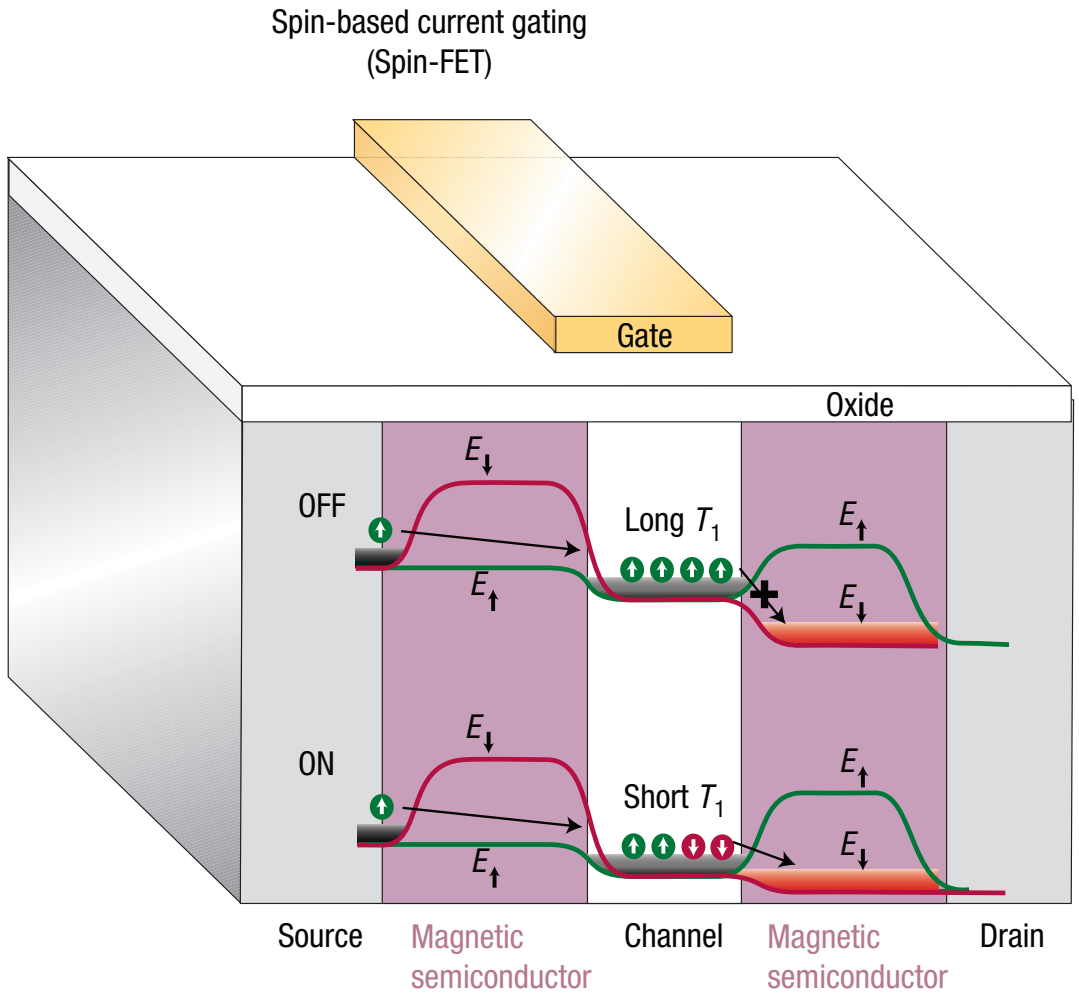
- Source und Drain: Parallele (oder antiparallele) Magnetisierung
- Ballistischer Transport spinpolarisierter Elektronen (**k**) im Gate-Kanal
- Kontrolle der Spinpräzession (Gatespannung, Material)

Stromfluss Source $\longrightarrow$ Drain

- *hoch* $\Leftrightarrow$ Spinpolarisation am Drain erhalten (Präzessionsperiode $\gg$ Flugzeit der Elektronen)
- *minimal* $\Leftrightarrow$ Spinpolarisation umgekehrt

Herkömmlicher FET vs. Spintransistor (SFET)





Prinzipien beim Spintransistor

Schaltprinzipien

- MOSFETs heben oder senken eine elektrische Barriere (viel Energie)
- SFETs nutzen statische spinabhängige Barrieren, Änderung der Elektronenspins im Gate (niedriger Energieaufwand).

Prinzipien beim Spintransistor

Schaltprinzipien

- MOSFETs heben oder senken eine elektrische Barriere (viel Energie)
- SFETs nutzen statische spinabhängige Barrieren, Änderung der Elektronenspins im Gate (niedriger Energieaufwand).

Aufgaben

Spininjektion $\longrightarrow$ Spintransport / -manipulation $\longrightarrow$ Spindetektion

Erzeugung spinpolarisierter Elektronen

Spinpolarisierte Elektronen im FM-Metall

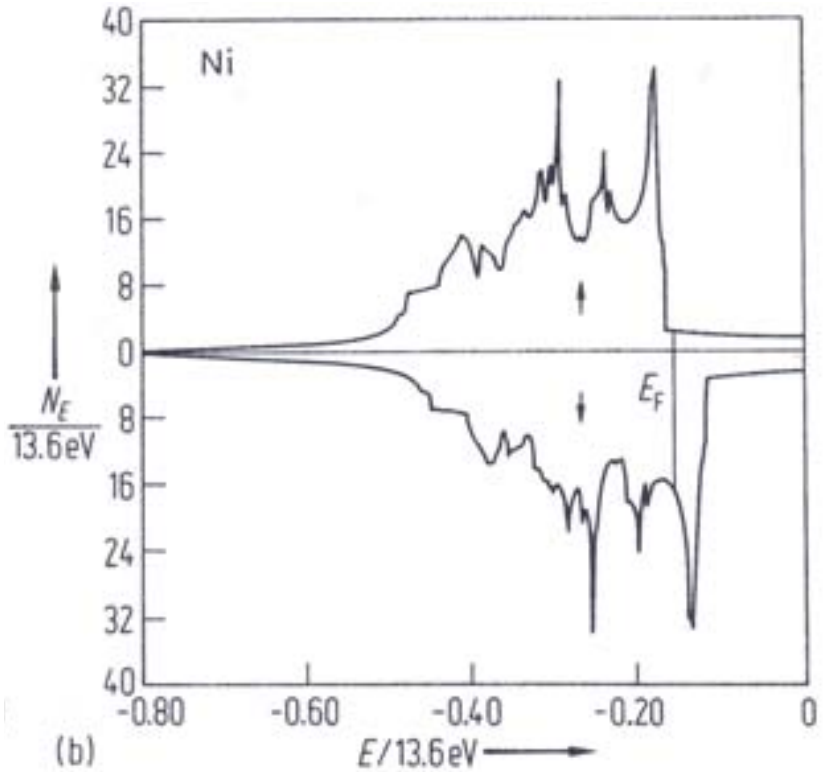
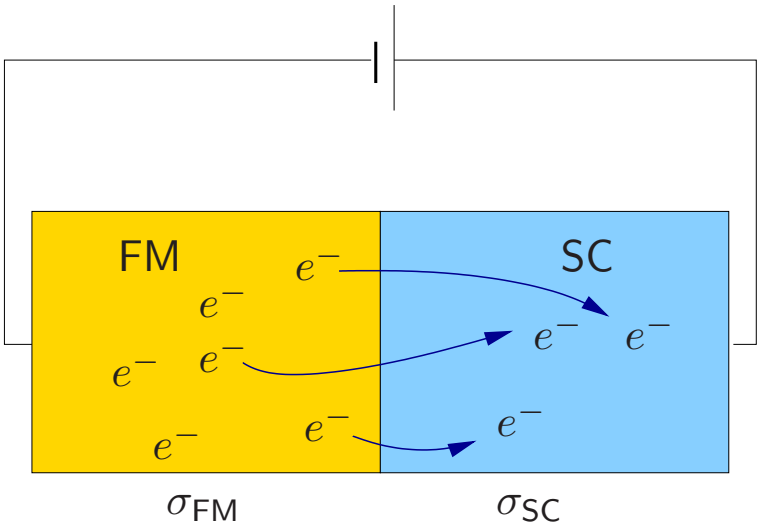


Abbildung: Elektronische Zustandsdichten der *d*- und *s*-Elektronen in Nickel für ↑-Spins und ↓-Spins. Die Zustandsdichte an der Fermikante besteht überwiegend aus $|\downarrow\rangle$-Elektronen.

Ohmsche Spininjektion

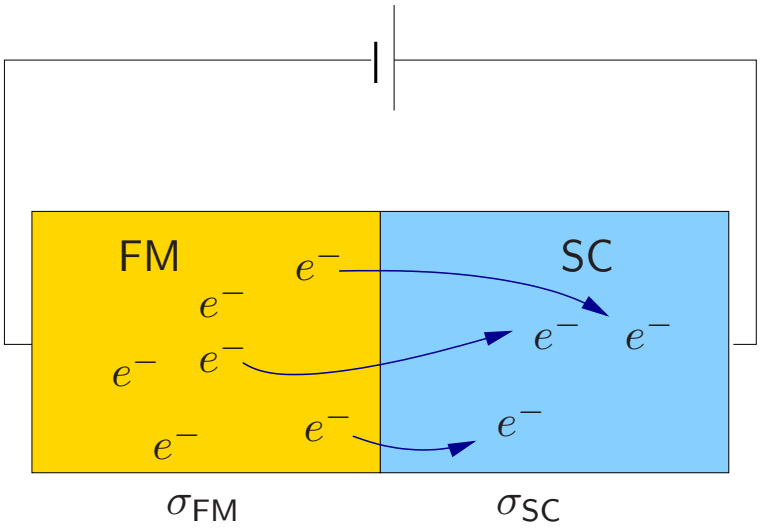


Metall (FM) $\longrightarrow$ Halbleiter (SC).

Leitfähigkeit abhängig von Spin und Material

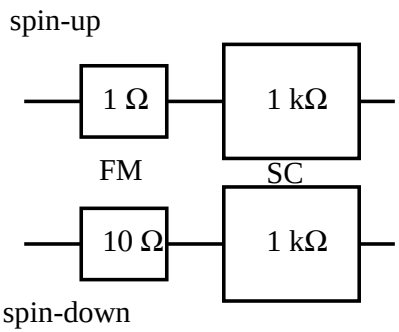
- $\sigma_{FM} \leqslant \sigma_{SC}$: effiziente Spininjektion
- $\sigma_{FM} \gg \sigma_{SC}$: sehr niedrige Injektion (typische Metalle)

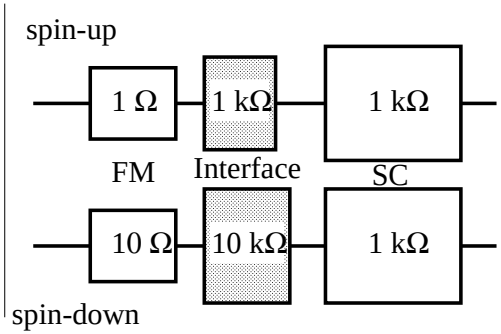
Ohmsche Spininjektion



Metall (FM) $\longrightarrow$ Halbleiter (SC).
Leitfähigkeit abhängig von Spin und Material

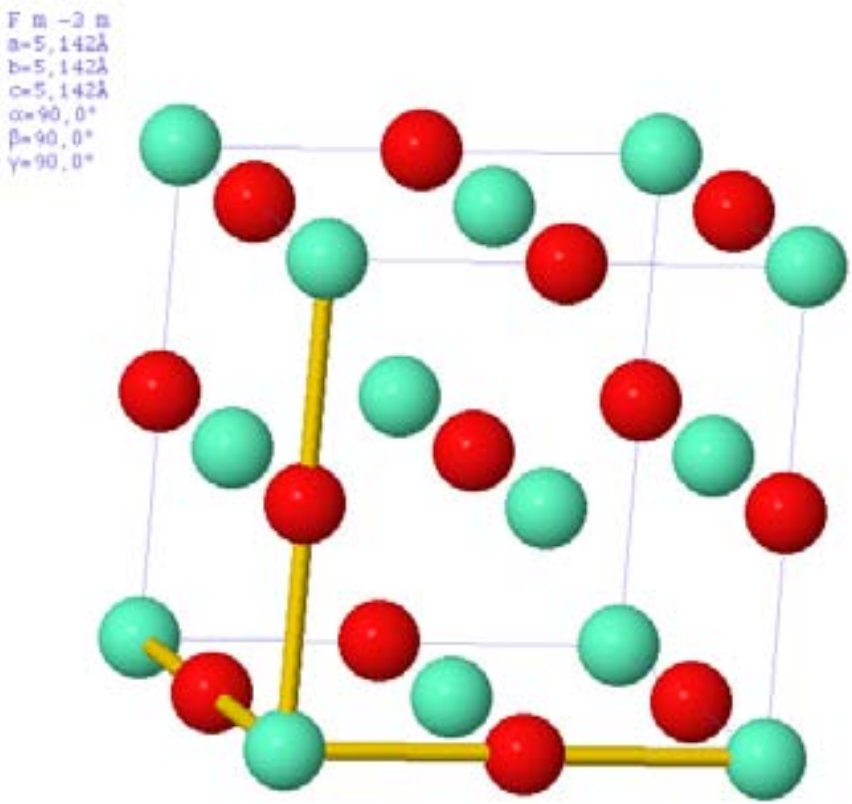
- $\sigma_{FM} \leqslant \sigma_{SC}$: effiziente Spininjektion
- $\sigma_{FM} \gg \sigma_{SC}$: sehr niedrige Injektion (typische Metalle)





- Interface-Schicht als Tunnelbarriere mit hohem Widerstand und Spinselektivität (*Schottky-Barriere*)
- Suche nach *ferromagnetischen Halbleitern*

Der ferromagnetische Halbleiter Europiumoxid



- Curie-Temperatur $T_C = 69\ \mathrm{K}$
- Effekte: Metall-Isolator-Übergang (*MIT*), Kolossaler Magnetwiderstand (*CMR*)
- Untersuchung des Leitungsbands mit spinaufgelöster Röntgenabsorptionsspektroskopie (*XAS*)

(Steeneken, Tjeng, et al., 2002)

Beweise für die Spinpolarisation in EuO

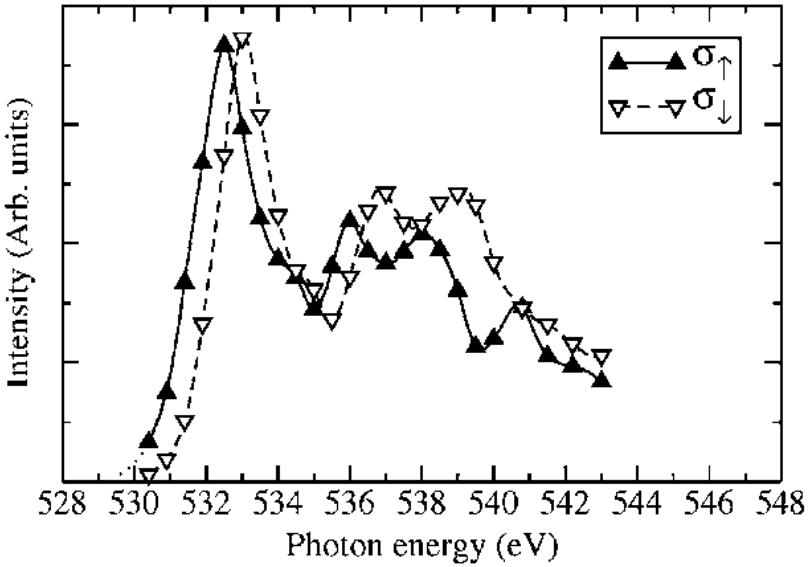


Abbildung: Spinaufgelöste XAS zeigt ein Splitting der $|\uparrow\rangle$- und $|\downarrow\rangle$-Peaks von $0,6\ \mathrm{eV}$ an der Unterkante des Leitungsbandes. (Steeneken, Tjeng, et al. 2001)

Beweise für die Spinpolarisation in EuO

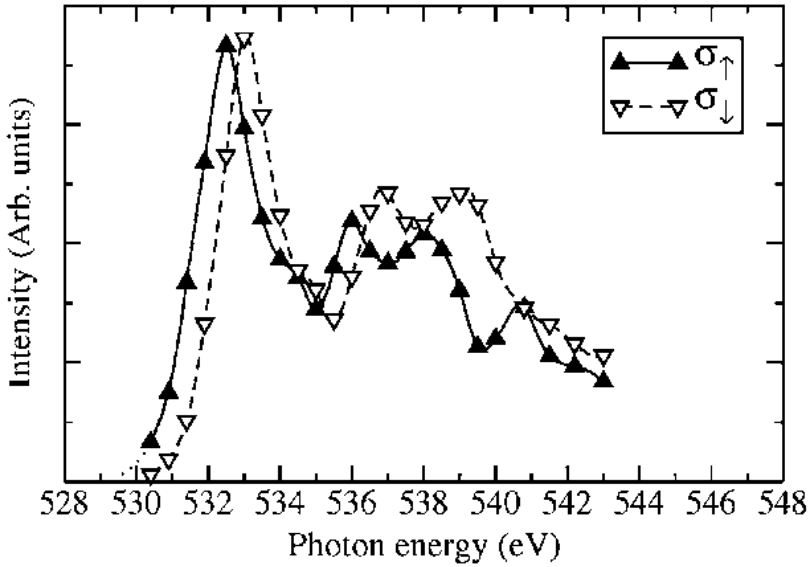
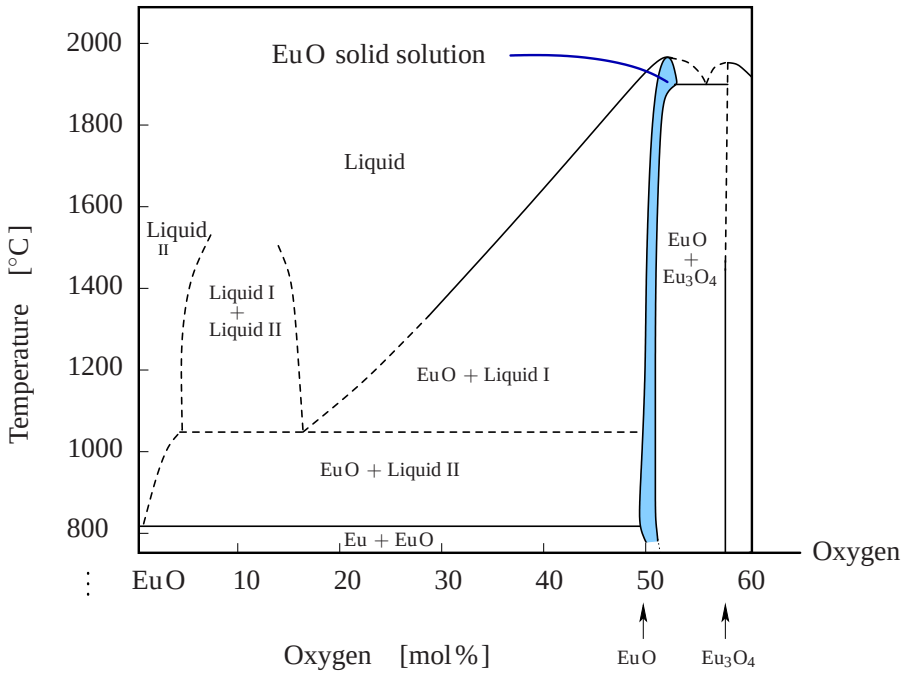


Abbildung: Spinaufgelöste XAS zeigt ein Splitting der $|\uparrow\rangle$- und $|\downarrow\rangle$-Peaks von $0,6\ \mathrm{eV}$ an der Unterkante des Leitungsbandes. (Steeneken, Tjeng, et al. 2001)

Folgerung

Elektronendotiertes EuO hat in der FM Phase fast 100% spinpolarisierte Leitungselektronen!

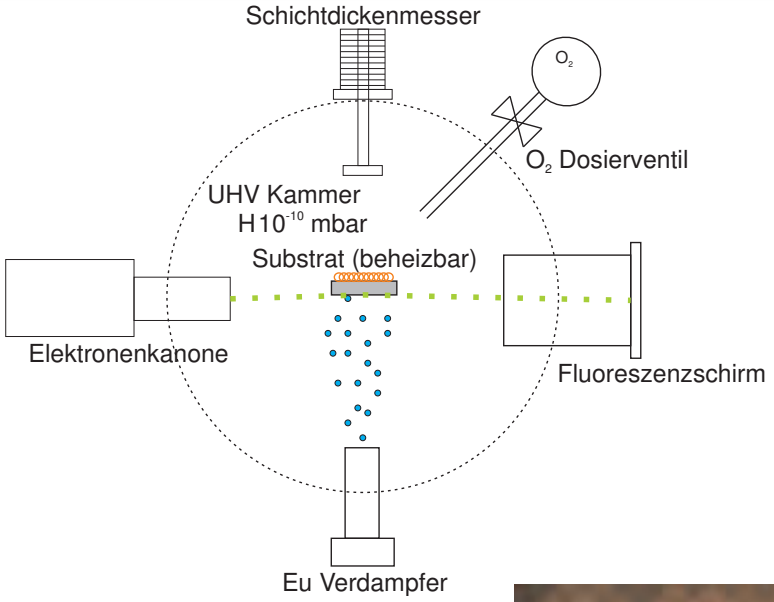
Herstellung des ferromagnetischen Halbleiters EuO



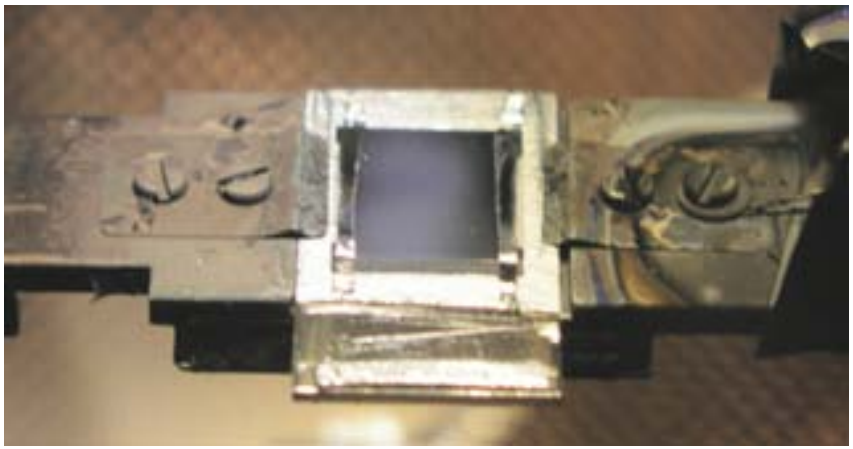
(Shafer, 1972)

- Untersuchung von EuO-Einkristallen (bulk) bereits in den 1970ern
- Schwierige Herstellung: Hohe Temperatur ($\leftrightarrow$ Halbleiter), exaktes stoichiometrisches Verhältnis
- Heute: Herstellung dünner Filme bei niedrigen Temperaturen

Herstellung von Europiumoxid in dünnen Filmen

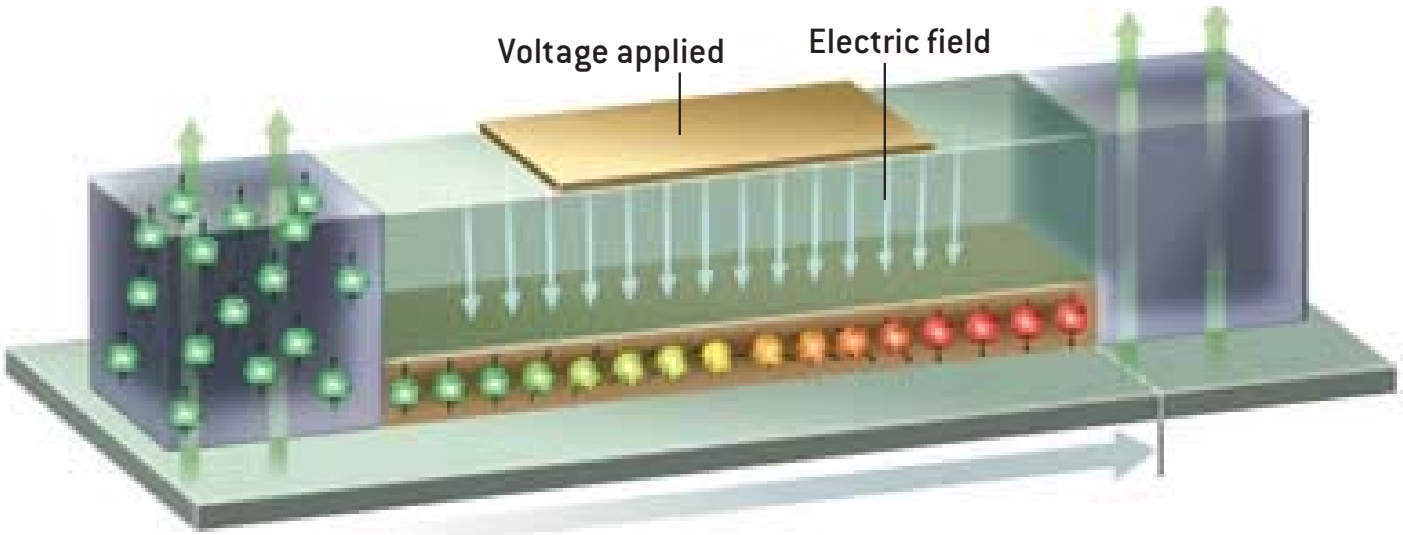


- EuO-Wachstum mittels MBE bei $350\ ^\circ\mathrm{C}$
- Wachstumsbedingung „Eu-rich EuO“
- $T_C = 69\ \mathrm{K}$ erhöhen
- Dotierung mit Gd, Abdeckung mit Al



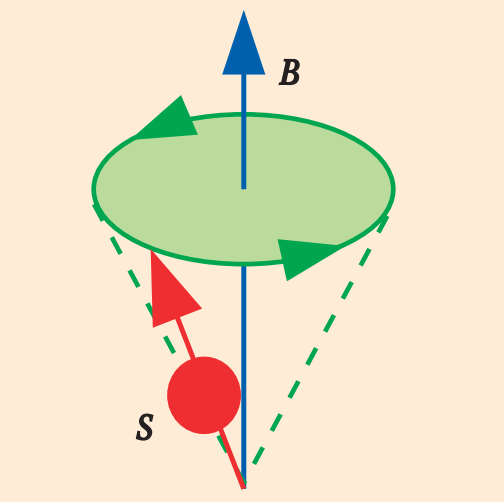
Spinmanipulation und -transport

Spinmanipulation



Wie kann man spinpolarisierte Ströme manipulieren?

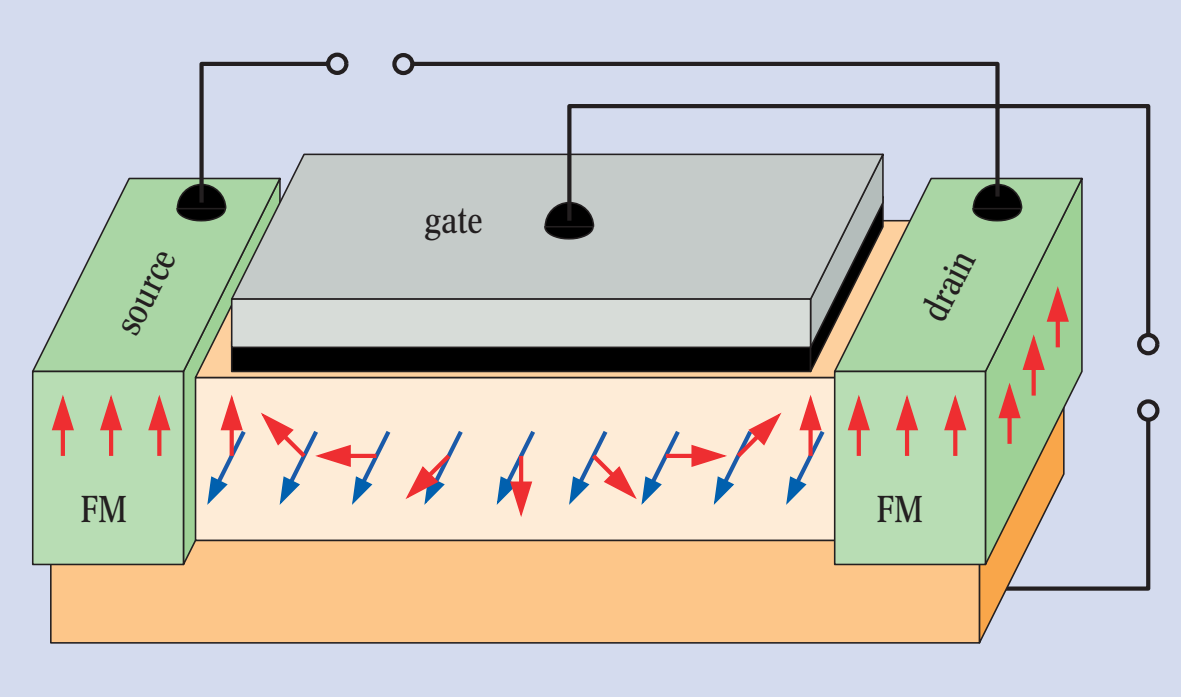
Spin-Bahn-Kopplung



Spin-Bahn-Kopplung:
$\mathcal{H} = \frac{1}{2c^2}\,\sigma\,(\boldsymbol{\nabla} U(\mathbf{r}) \times \mathbf{p})$

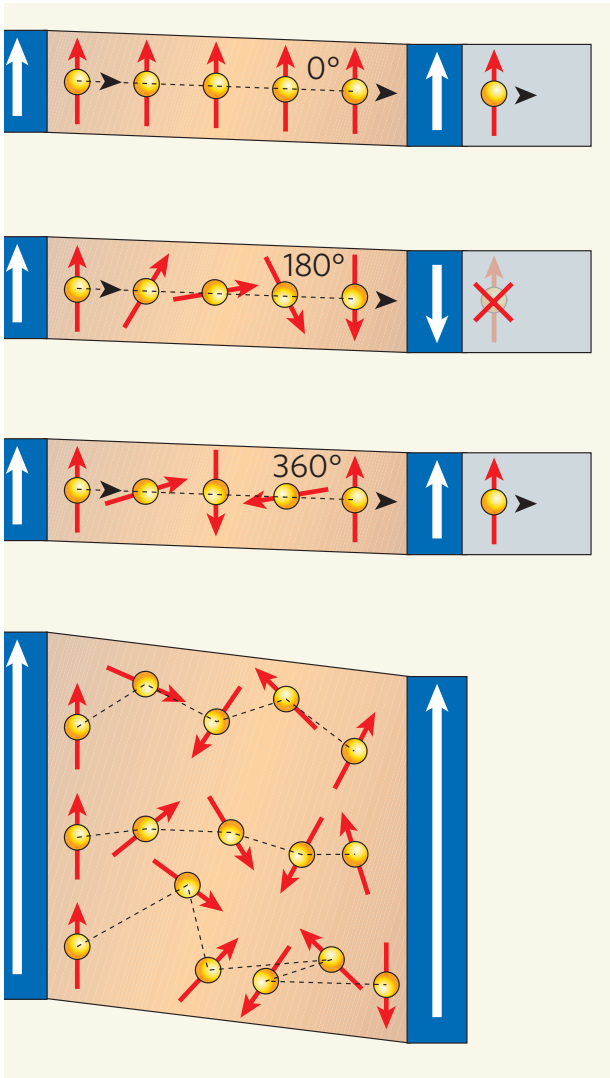
- Kopplung zwischen Spinmoment $\hat{\mathbf{S}}$ und Bahndrehimpuls $\hat{\mathbf{L}}$ in Anwesenheit eines elektrischen Feldgradienten $\boldsymbol{\nabla} U$
- $\boldsymbol{\nabla} U \quad \curvearrowright$ atomar: Kernpotenzial; an Grenzflächen: äußere Felder

Spinmanipulation durch elektrischen Feldgradient



- SFET: Elektrisches Feld am Gate führt zu einer Spin-Bahn-Kopplung
- $\Rightarrow$ Effektives Magnetfeld (blau) senkrecht zur Transportrichtung und senkrecht zum elektrischen Feld

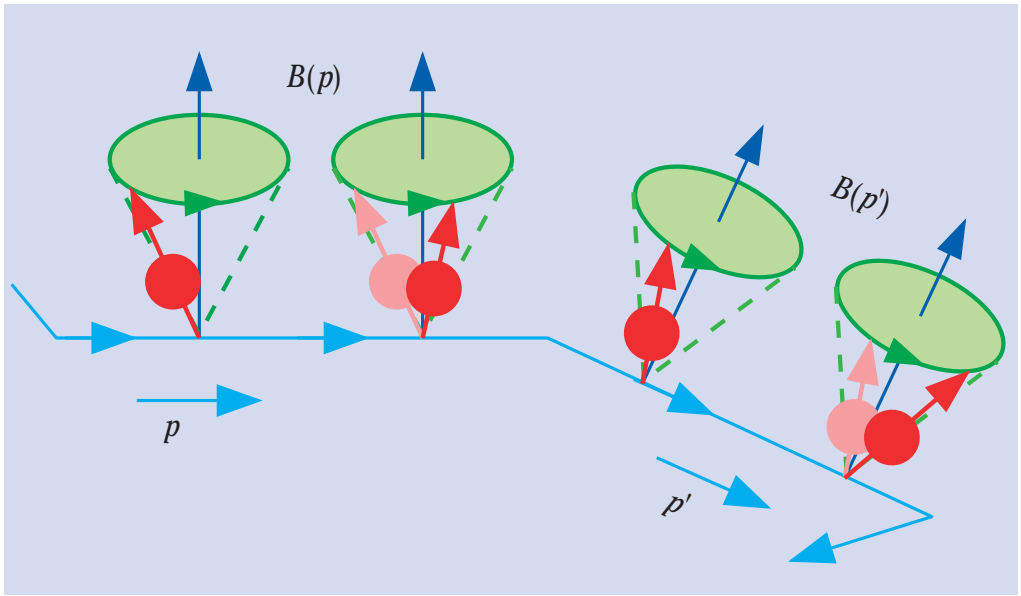
Kontrolle der Spinpräzession



In einem Magnetfeld (**B** $\perp$ Bildfläche) präzedieren Elektronenspins mit einer Frequenz proportional zur B-Feldstärke

1. Keine Präzession: Spinpolarisierter Strom fließt durch die FM-Filter
2. $180°$-Präzession: Stromfluss ist minimal
3. $360°$-Präzession: Spinpolarisierter Strom fließt
4. Sehr schnelle Präzession: Diffuser Transport, Streuung an Gitterstörstellen dominiert $\rightsquigarrow$ keine Spinpräzession detektierbar

Spinrelaxation nach D'yakonov und Perel



- Der Spin **S** (rot) eines Elektrons mit Impuls **p** präzediert im effektiven Magnetfeld **B**
- **B**(**p**) ändert sich aufgrund Impulsstreuung, *bevor* sich die Orientierung von **S** ändert
- $\Rightarrow$ Unterdrückung der Spinstreuung durch häufige Impulsstreuung

Die Spinrelaxationszeit

- Die Spinrelaxationszeit ist die Zeit, innerhalb der die Spinpolarisation verlorengeht

Die Spinrelaxationszeit

- Die Spinrelaxationszeit ist die Zeit, innerhalb der die Spinpolarisation verlorengeht
- Bereich von Pikosekunden bis viele Millisekunden (Silizium), abhängig vom Halbleitermaterial und Kristallorientierung

Die Spinrelaxationszeit

- Die Spinrelaxationszeit ist die Zeit, innerhalb der die Spinpolarisation verlorengeht
- Bereich von Pikosekunden bis viele Millisekunden (Silizium), abhängig vom Halbleitermaterial und Kristallorientierung
- *Lange* Relaxationszeiten erwünscht, wenn Spins räumlich entfernt vom Spininjektor verarbeitet werden
- *Kurze* Relaxationszeiten ermöglichen ein extrem schnelles Ausschalten von Halbleiterelementen (Halbleiterlaser)

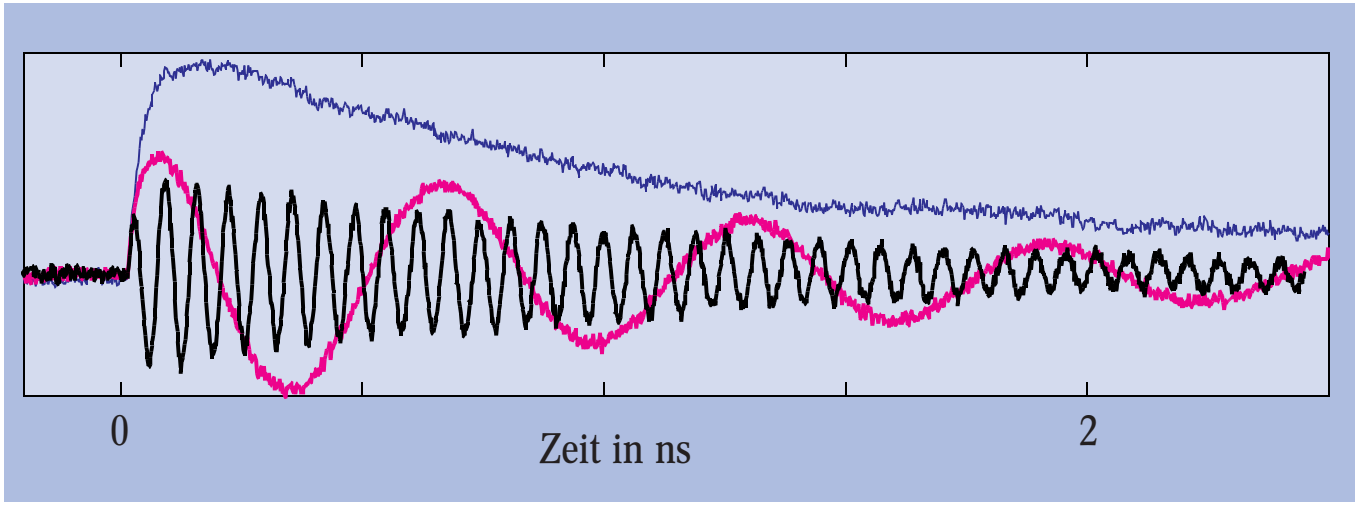
Die Spinrelaxationszeit

- Die Spinrelaxationszeit ist die Zeit, innerhalb der die Spinpolarisation verlorengeht
- Bereich von Pikosekunden bis viele Millisekunden (Silizium), abhängig vom Halbleitermaterial und Kristallorientierung
- *Lange* Relaxationszeiten erwünscht, wenn Spins räumlich entfernt vom Spininjektor verarbeitet werden
- *Kurze* Relaxationszeiten ermöglichen ein extrem schnelles Ausschalten von Halbleiterelementen (Halbleiterlaser)

Bedeutung

Kontrolle der Spinrelaxation in der Spintronik $\Longleftrightarrow$ Kontrolle der Leitfähigkeit in konventioneller Elektronik.
Ziel: Spinpolarisation aufrechterhalten

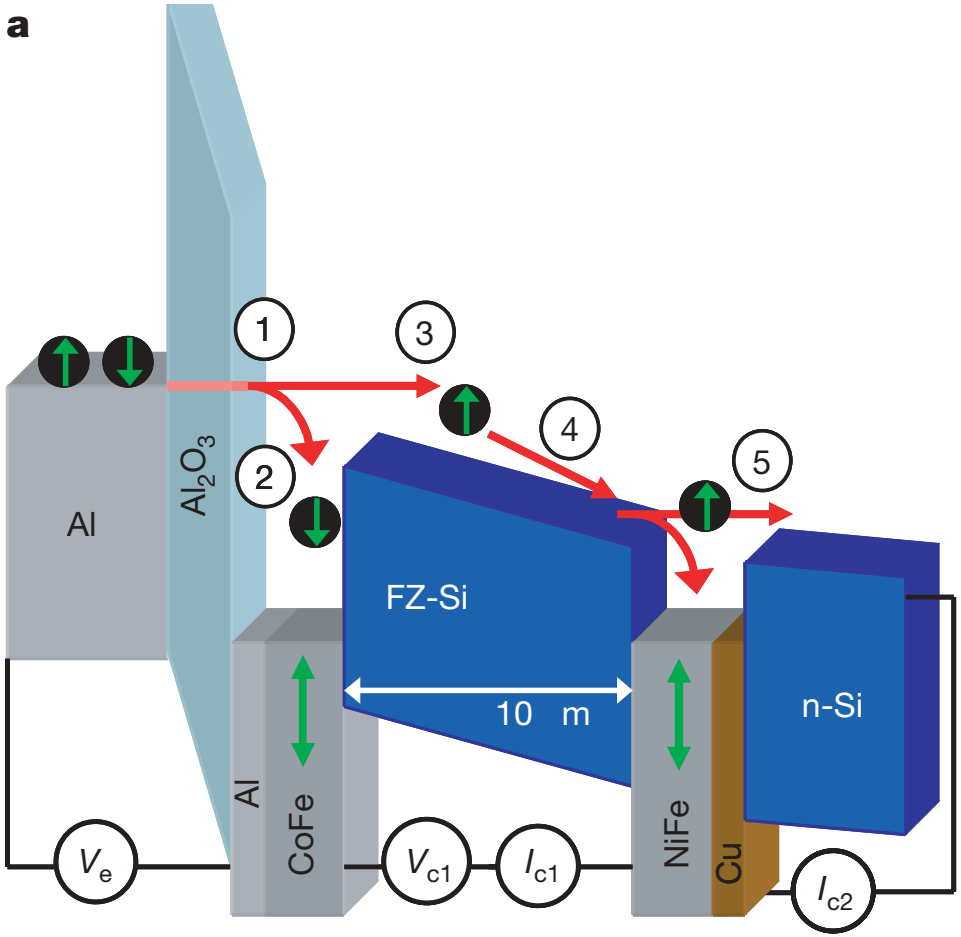
Spinspeicherung gemessen durch Kerr-Rotation



- Bei schwachem äußerem Magnetfeld präzedieren die ausgerichteten Spins
- Die Oszillation kann mit Hilfe der Messung der Kerr-Rotation ($\propto$ Magnetisierung) aufgelöst werden
- $B = 0$ (blau): keine Oszillation; $B = 0,025\ \mathrm{T}$ (rot): mittlere Oszillation; $B = 0,25\ \mathrm{T}$ (schwarz): schnelle Oszillation

Kontrollierter Spintransport in Silizium

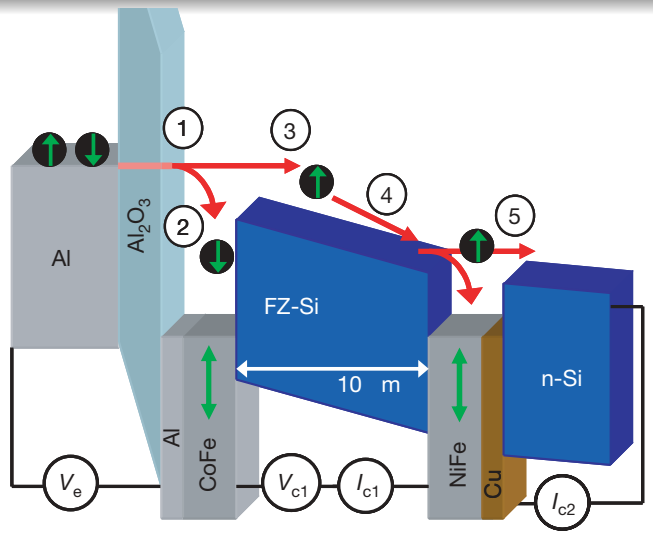
Der Silizium Spintransport-Aufbau



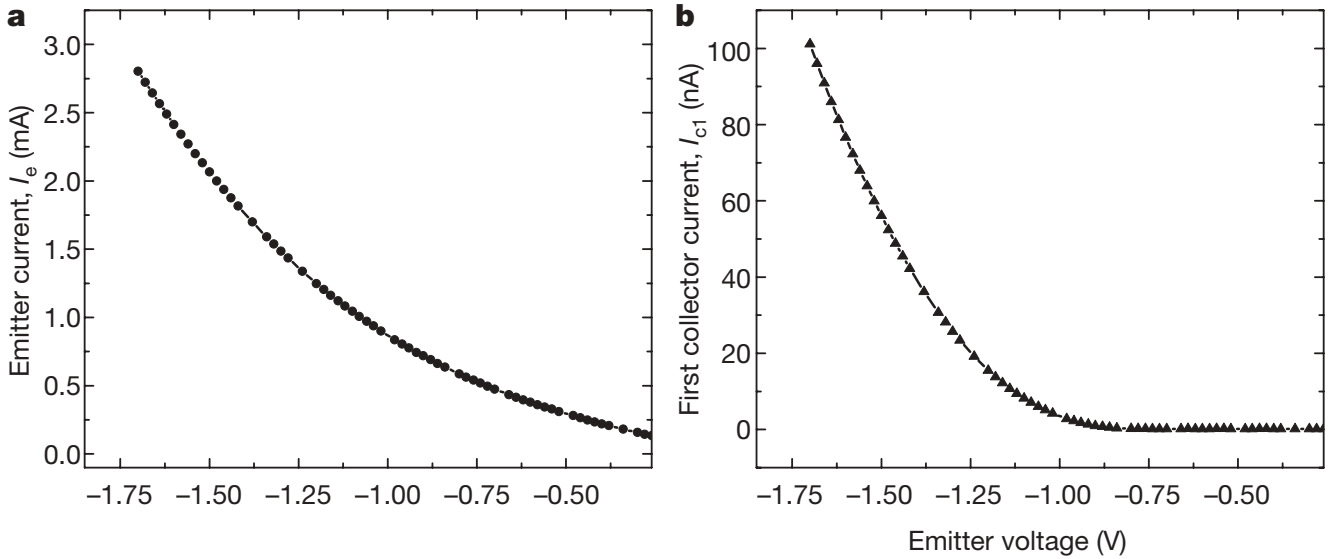
1. Injektion heißer Elektronen in CoFe
2. Dämpfung der Minoritätselektronen
3. Transport spinpolarisierter Elektronen über Schottky-Barriere
4. Spintransport durch $10\ \mu\mathrm{m}$ reines Si
5. Spinfilterung (Detektion)

„Elektronisches Analogon“ zu optischen Polarisationsanalyse-Experimenten
(Appelbaum et al., 2007)

Spintransport in Si: Emitter-Collector-Strom

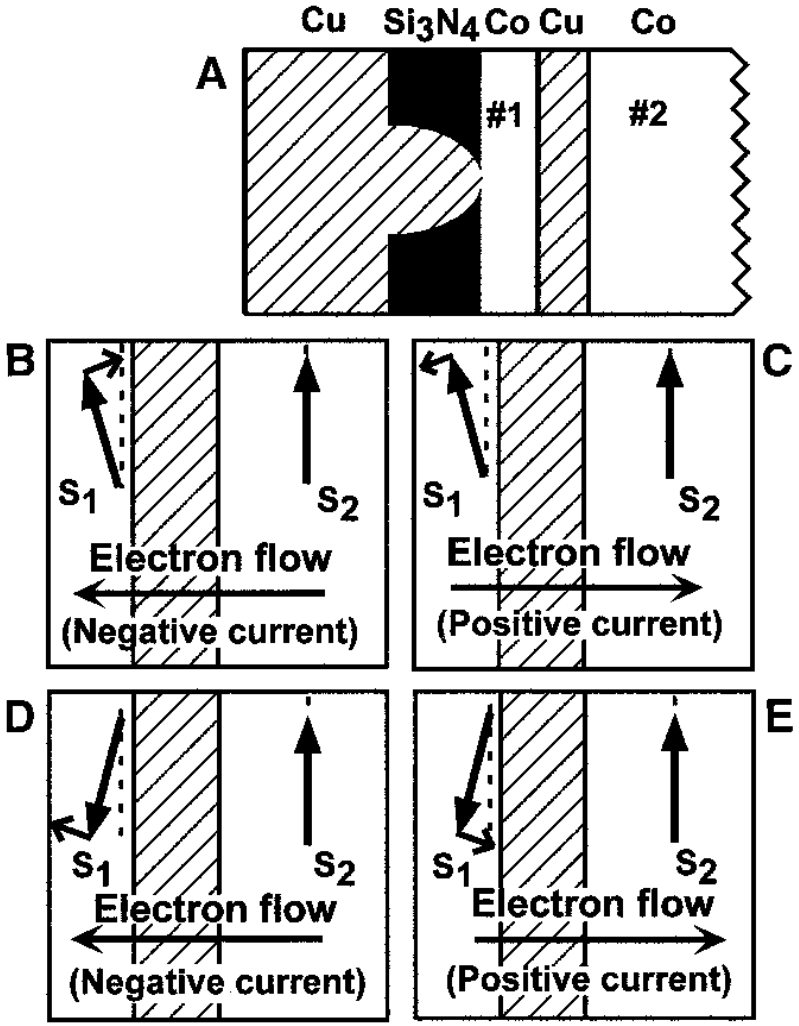


(Appelbaum, et al., Mai 2007)



Änderung magnetischer Domänen durch spinpolarisierte Ströme

Änderung magnetischer Domänen durch Spins



- *Spinpolarisierter Strom* erzeugt *Drehmomente* auf die magnetischen Momente in dünner Co-Schicht (#1)
- Momente in magn. Schichten: $\tau_{1,2} \propto I\, \hat{\mathbf{s}}_{1,2} \times (\hat{\mathbf{s}}_1 \times \hat{\mathbf{s}}_2)$ $\Rightarrow$ Asymmetrie in Bezug auf die Stromrichtung
- Stabilität magn. Momente: „negative“ Stromstärke $\Rightarrow$ parallele $\hat{\mathbf{s}}_i$ stabil „positive“ Stromstärke $\Rightarrow$ antiparallele $\hat{\mathbf{s}}_i$ stabil

Änderung magnetischer Domänen durch Spinströme

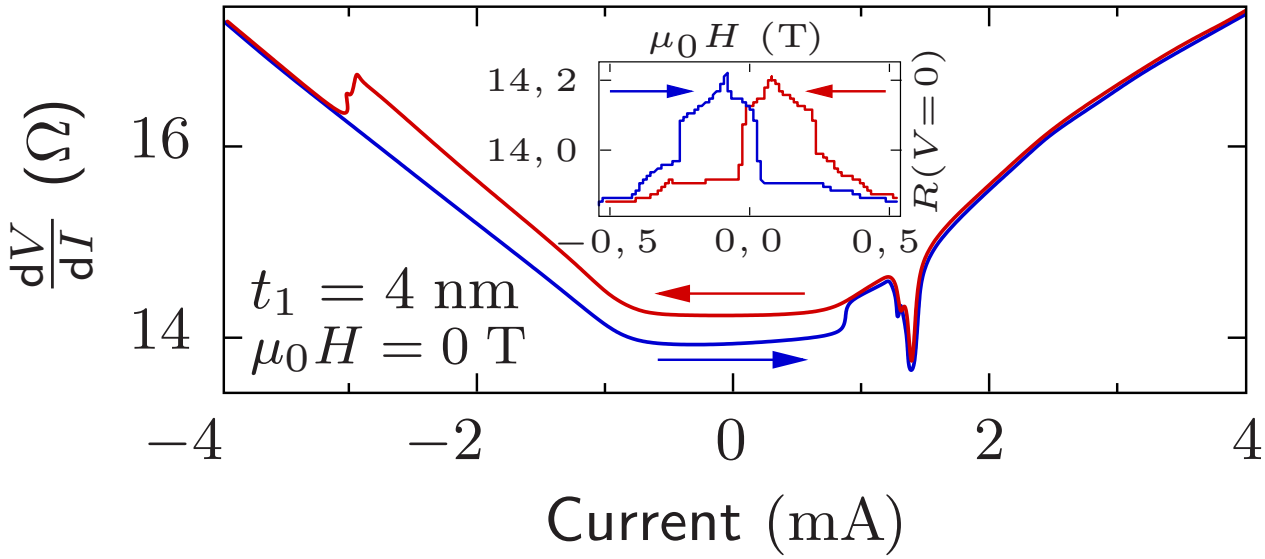


Abbildung: Hysterese ⇒ Magnetische Domänen können in der dünnen Co-Schicht kontrolliert umgeklappt werden (antiparallel ⇆ parallel)

Änderung magnetischer Domänen durch Spinströme

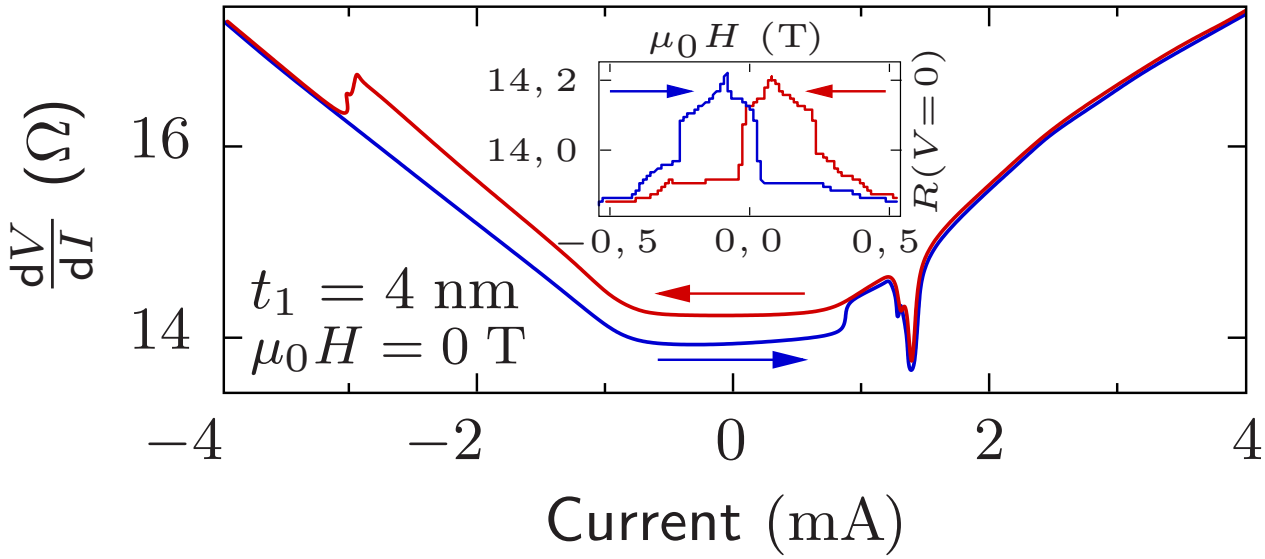


Abbildung: Hysterese ⇒ Magnetische Domänen können in der dünnen Co-Schicht kontrolliert umgeklappt werden (antiparallel ⇆ parallel)

Folgerungen

- Maximale Stromstärken für GMR-basierte Messsonden sind begrenzt
- Magnetischer RAM: Lesen *und Schreiben* durch lokale Austauscheffekte (Spinströme) – statt durch langreichweitige Magnetfelder

Zusammenfassung

Prinzipien der Spintronics

Basis

Nutzung des Spinfreiheitsgrades der Elektronen

Klassische Spintronics

- Magnetisch schreiben und elektrisch auslesen (GMR)
- GMR-Magnetfeldsonden, Festplattenleseköpfe, MRAM-Chips

Moderne Spintronics

- Elektrische Manipulation des Spinstroms (Spin-Bahn-Kopplung)
- Spinströme schreiben magnetische Daten (Co-Schicht)
- Spintransistor, elektrisch geschalteter magn. Speicher

Aktuelle Forschung

Neue Bauelemente...

...nutzen unterschiedliche Leitfähigkeiten für ↑- und ↓-Elektronen.
(Orientierung der Spins zu den magnetischen Momenten im FM)

Spininjektion und Spinmanipulation

Vor allem Ohmsche Injektion und Injektion „heißer“ Elektronen.
Manipulation durch elektrische Felder und Strompulse

Neue Materialien

- Ferromagnetische Halbleiter
- Ferromagnetische Halbmetalle, die spinpolarisierte Elektronen zur Verfügung stellen (Beispiel EuO)
- Was passiert bei Doping?

Zusatzinformationen

Spinpolarisation aus Symmetrieverletzung

Zeitumkehrsymmtrie: $E(\mathbf{k}) = E(-\mathbf{k}); \quad P(\mathbf{k}) = -P(-\mathbf{k})$

Inversionssymmetrie: $P(\mathbf{k}) = P(-\mathbf{k})$

Spinpolarisation aus Symmetrieverletzung

Zeitumkehrsymmtrie: $E(\mathbf{k}) = E(-\mathbf{k}); \quad P(\mathbf{k}) = -P(-\mathbf{k})$

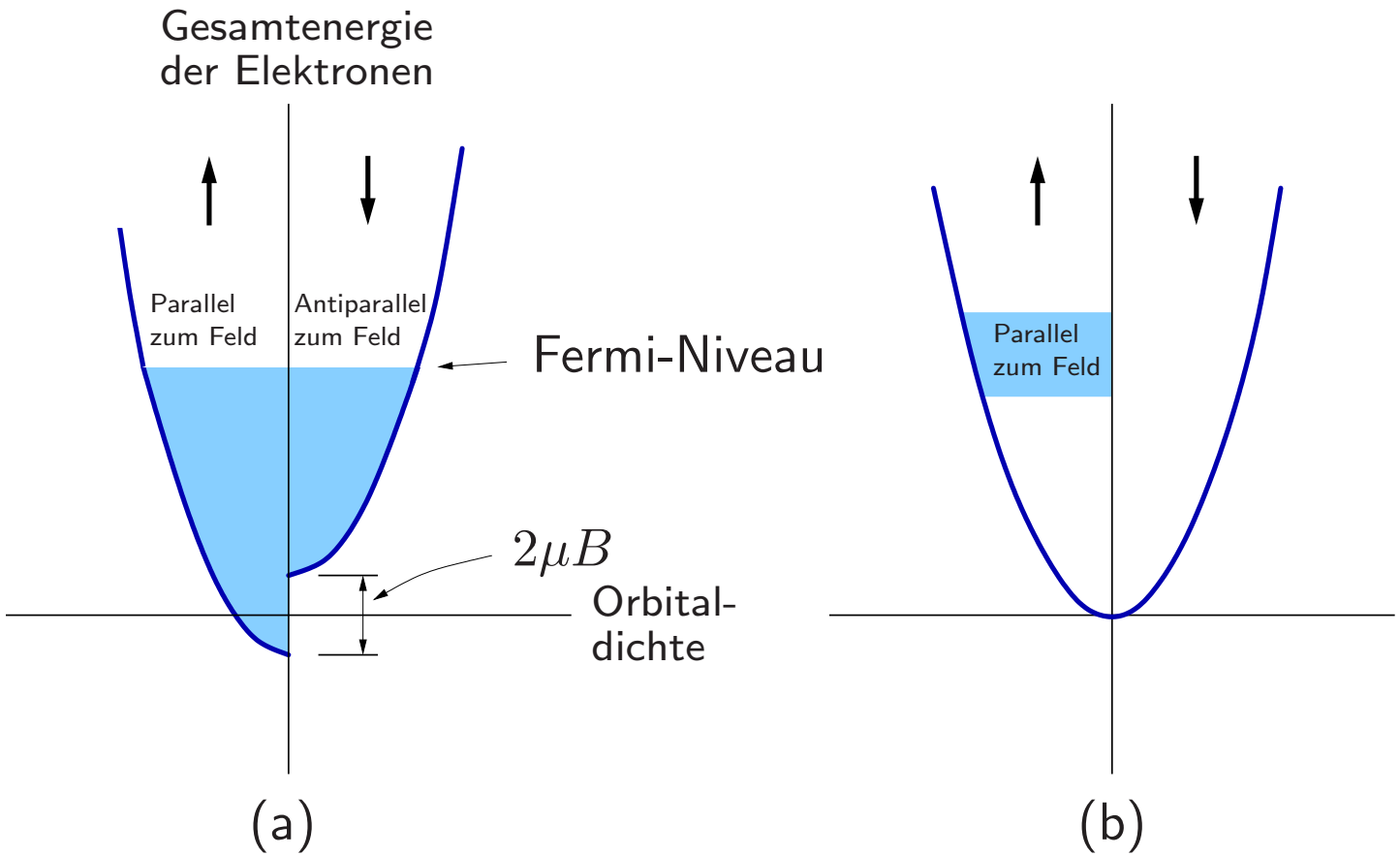
Inversionssymmetrie: $P(\mathbf{k}) = P(-\mathbf{k})$

An Grenzflächen wird die Inversionssymmetrie gebrochen, nur $\mathbf{k}_{||}$ ist „gute Quantenzahl“

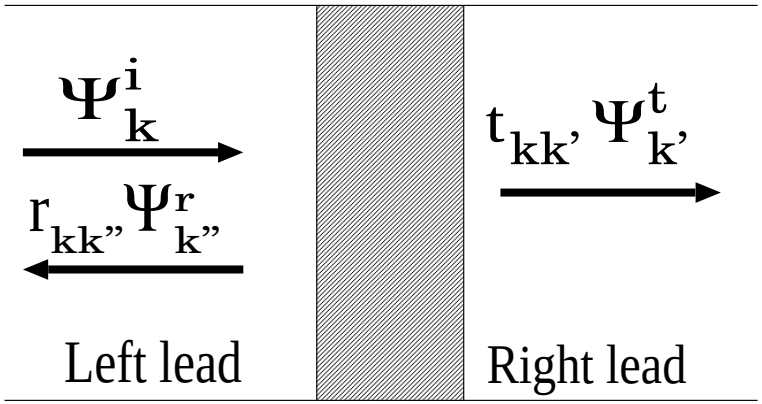
$P(\mathbf{k}_{||}) = P(-\mathbf{k}_{||})$

} Polarisation möglich

Zustandsdichte der Elektronen abhängig von Spin



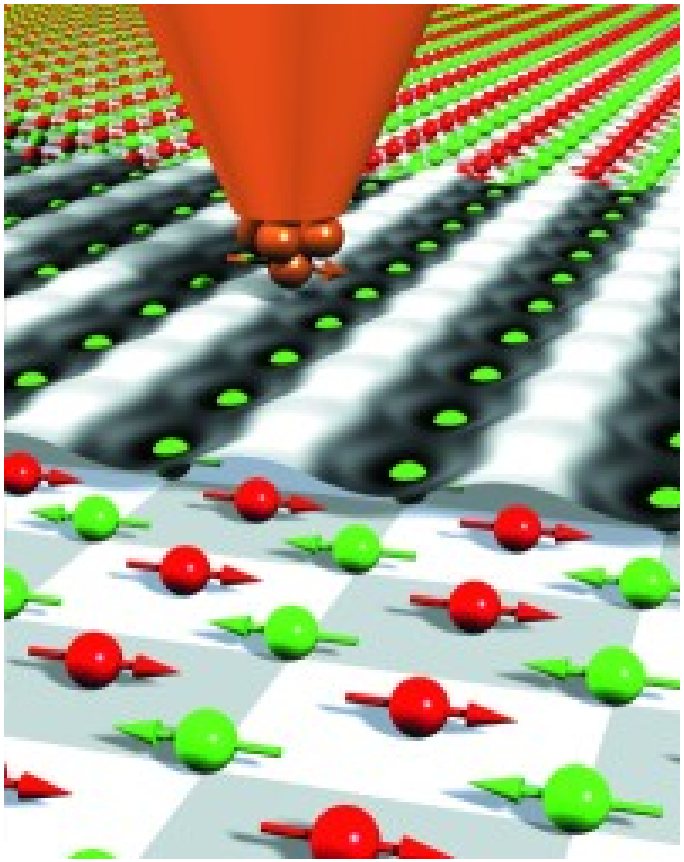
Ballistische Elektronen-Injektion



Prinzip

Unterschied der Spinelektronen-Leitungsbänder
$\Rightarrow$ spinabhängige Übergangswahrscheinlichkeit der ballistischen Elektronen

Tunnelinjektion



Ein Rastertunnelmikroskop mit ferromagnetischer Spitze wird benutzt, um im Vakuum Spins in einen Halbleiter zu injizieren. Die Spins werden während des Tunnelns durch das Vakuum konserviert.

Anwendung: tunnel diode (M-iso-SC); Schottky-barrier diode (M-SC)

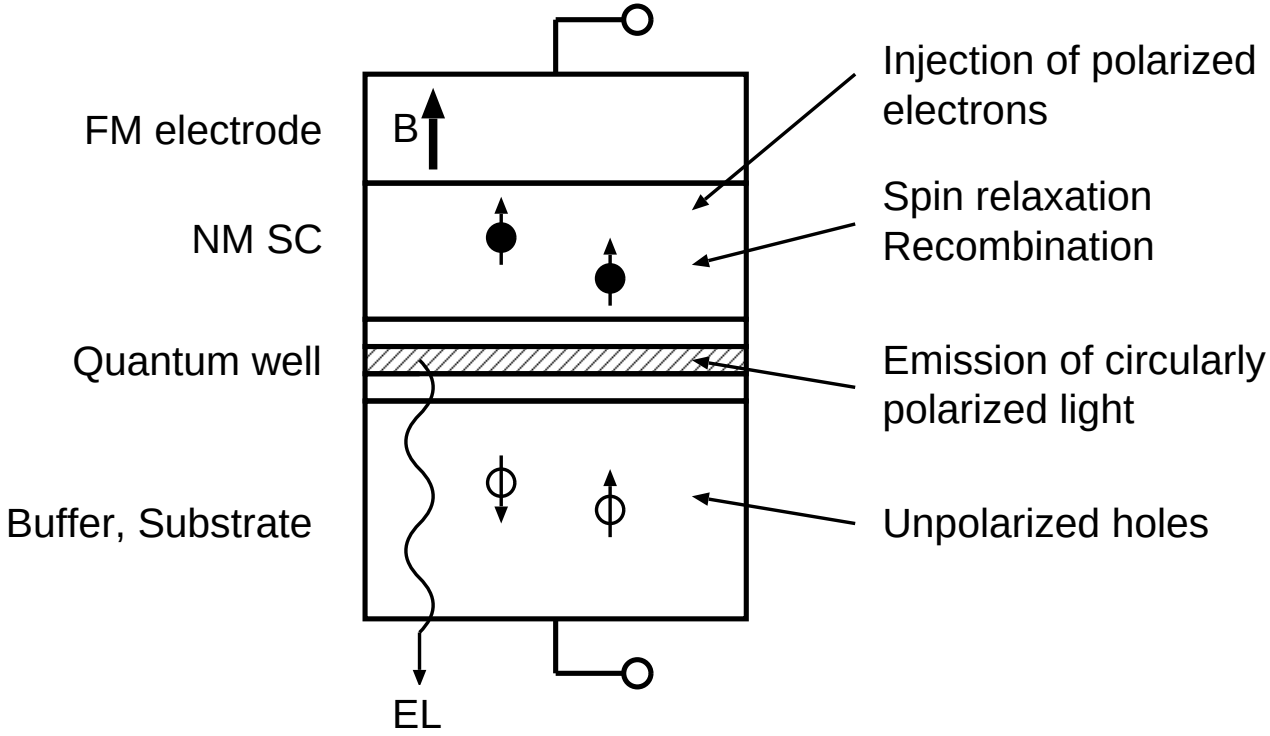
Injektion heißer Elektronen

- Tunnelinjektion der Elektronen mit $E \gg E_{\mathrm{F}}$ in eine ferromagnetische Schicht.
- Die Mehrheit und die Minderheit der spinpolarisierten Elektronen haben sehr unterschiedliche inelatische freie Weglängen in der ferromagnetischen Schicht (z. B. ferromagnetische $3\ \mathrm{nm}$-Co-Schicht).
- Die Bandstrukturdifferenzen zwischen M und SC müssen klein sein, um Umklappstreuung der Spins zu vermeiden. Gesamtenergieeffizienz niedrig.

Methode	Effektivität	Probleme
Ohmsche Spininjektion	$4,5\ \%$	abhängig von den Leitfähigkeiten FM/M
Ballistische Elektronen-Injektion	$> 40\ \%$ bei Punktkontakten	aufwändige Herstellung

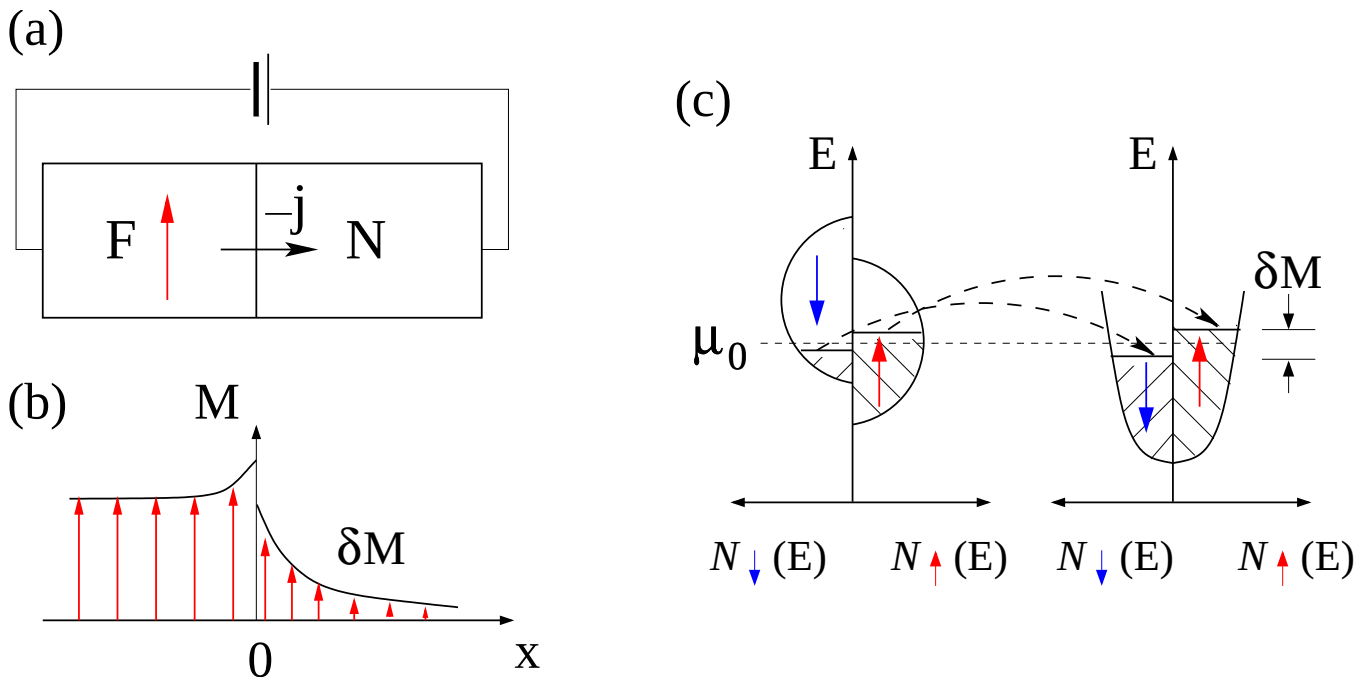
Methode	Effektivität	Probleme
Ohmsche Spininjektion	$4,5\ \%$	abhängig von den Leitfähigkeiten FM/M
Ballistische Elektronen-Injektion	$> 40\ \%$ bei Punktkontakten	aufwändige Herstellung
Tunnelinjektion	$2\ \%$	(nur) für Grundlagenexperimente
Injektion heißer Elektronen	$> 90\ \%$	Umklappstreuung der Spins, Gesamtenergieeffizienz ist niedrig

Messung der Spininjektion



1. Injektion spinpolarisierter Elektronen von FM in Halbleiter
2. Bewegung in die Quantenmulde in der Mitte des Schichtsystems
3. Rekombination mit Elektronenlöchern beider Spinrichtungen $\rightsquigarrow$ Emission von Photonen
4. Erfolgreiche Spininjektion $\leftrightsquigarrow$ Polarisation der Photonen

Spininjektion von einem FM in ein normales Metall



(a) Geometrie
(b) Magnetisierung M als Funktion der Nichtgleichgewichtsmagnetisierung δM (spin accumulation) wird in ein normales Metall injiziert
(c) Verteilung verschiedener spinaufgelöster Zustandsdichten über eine FM-N Grenzfläche. (Žutić et al., 2004)

TMR – Jullière-Modell des Tunnelns

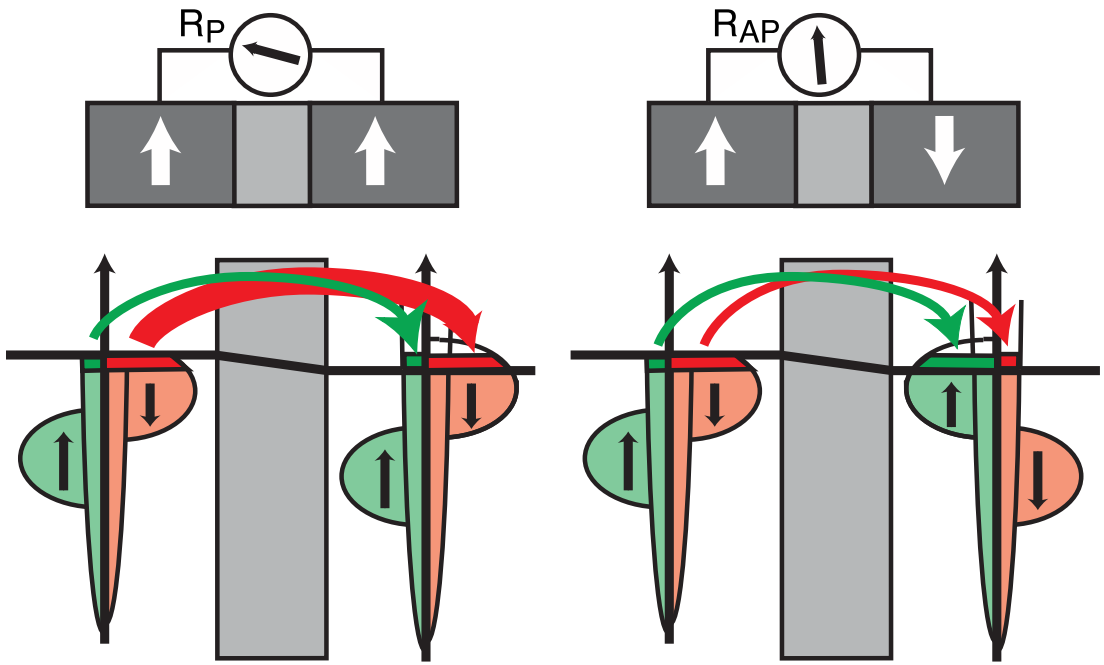
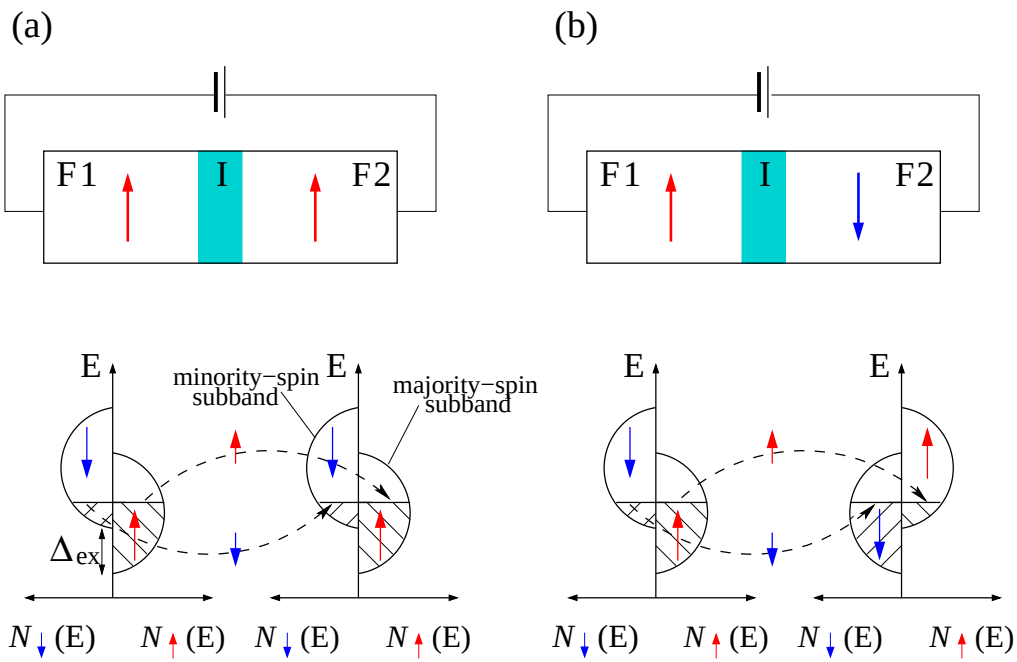


Abbildung: Bei parallelen Magnetisierungsrichtungen: Tunneln von Majoritätsspinzuständen nach Majoritätsspinzuständen. Bei antiparalleler Magnetisierung: Tunneln zwischen Majoritäts- und Minoritätsspinzuständen. Tunnelrate $\propto$ Zustandsdichte der Anfangs- und Endzustände der jeweiligen Tunnelprozesse.

Elektronentunneln in FM–Iso–FM tunnel junctions

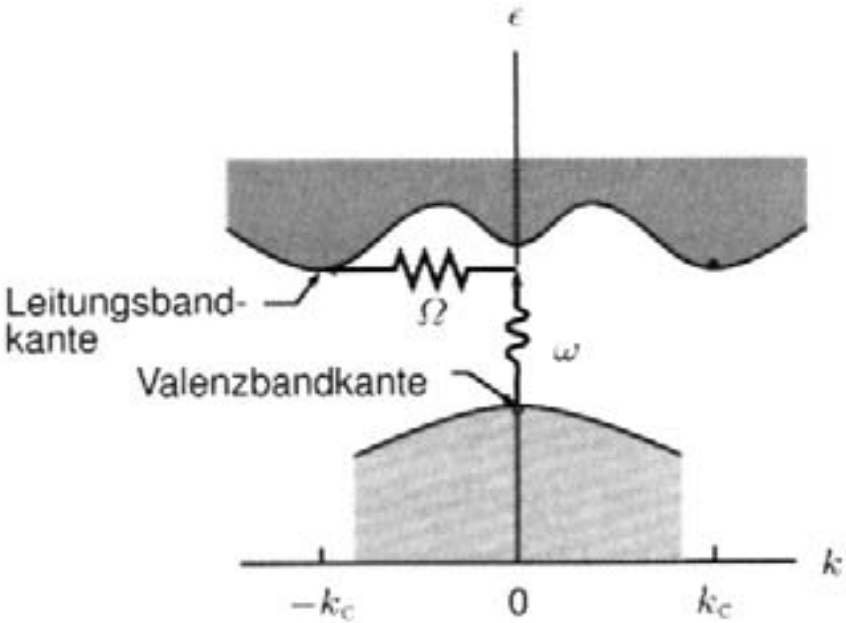


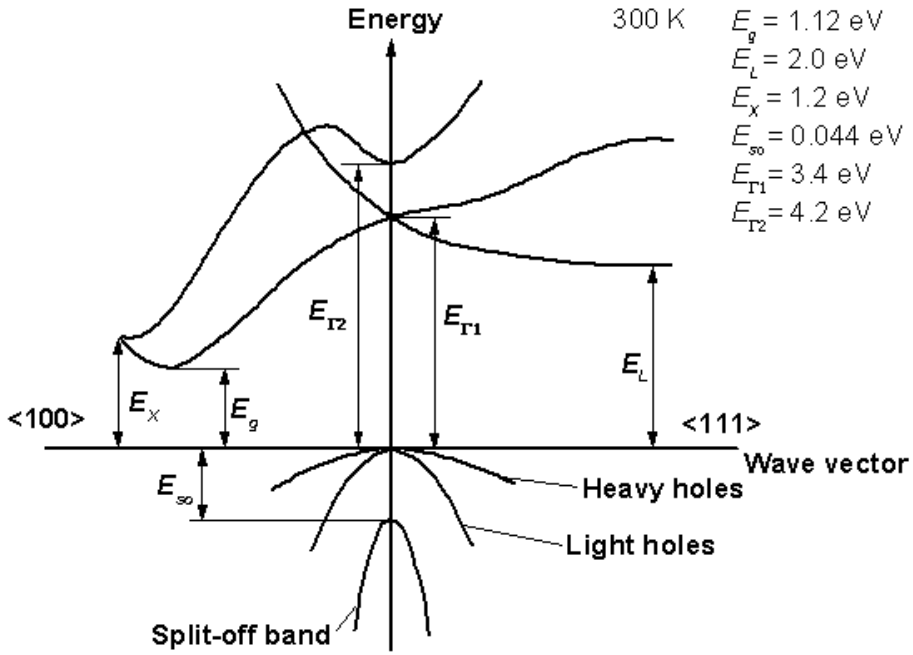
(a) Parallele und (b) antiparallele Magnetisierungen mit den entsprechenden Spinzustandsdichten der *d*-Zustände in FM-Metallen.

Die Pfeile der Austausch-Spin-Aufspaltung Δ_{ex} in den beiden ferromagnetischen Bereichen sind durch das Majoritätsspin-Subband bestimmt.

Gestrichelt: Tunneln mit Konservierung des Spins.

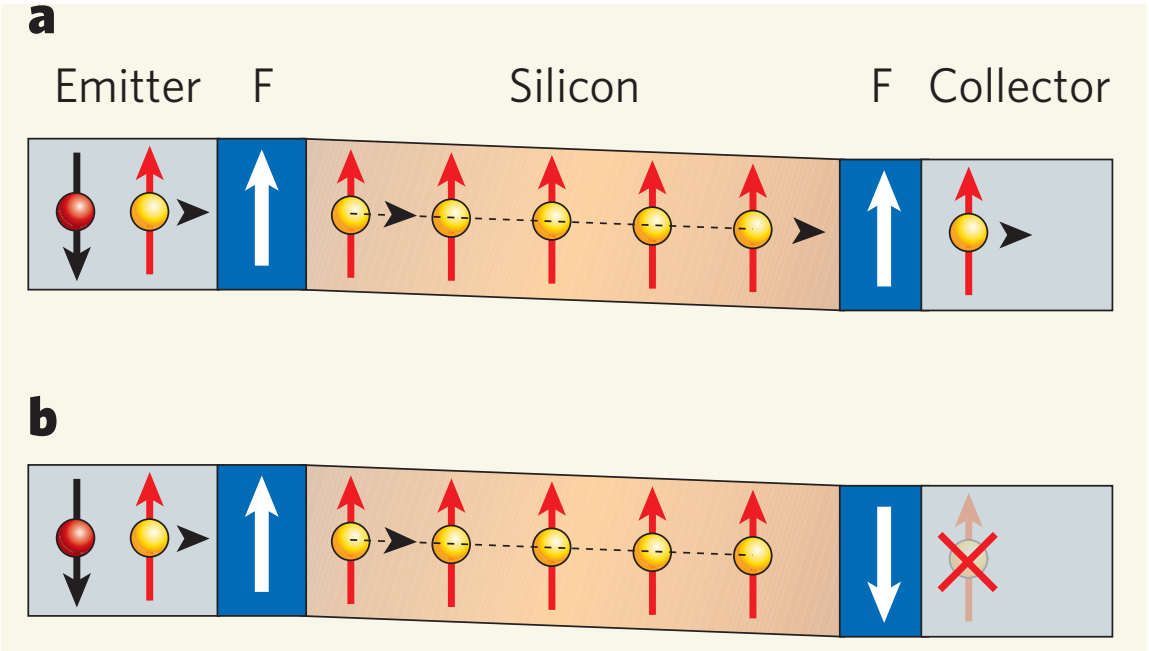
Bandstruktur von Silizium





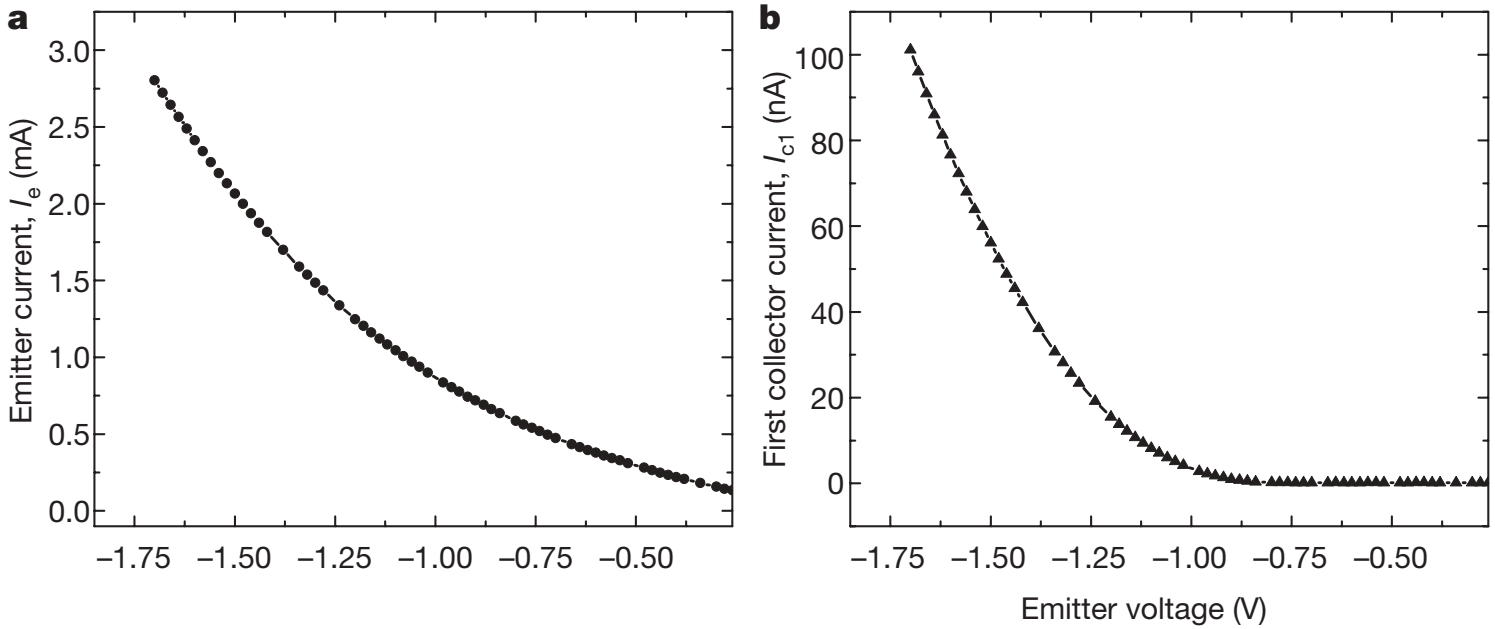
- Im indirekten Übergang sind die Bandkanten des Valenz- und Leitungsbandes im **k**-Raum weit entfernt. Die Energieschwelle für den indirekten Prozess ist größer als die eigentliche Bandlücke
- Übergang im Bild: $\hbar\omega = E_g + \hbar\Omega$
  Ω: Frequenz eines Phonons mit $\mathbf{k} = -k_c$

Spininjektion in Silizium: Spinvalve



- Im Spinventil („Spinvalve“) lassen ferromagnetische Schichten (F) nur Elektronen einer Polarisation passieren
- FM-Schichten parallel $\rightsquigarrow$ Stromfluss von Emitter zu Collector, antiparallel $\rightsquigarrow$ kein Stromfluss
- Der relative Unterschied des Collector-Stroms ist das Spinvalve-Signal
- Geringe Ausbeute von $2\,\%$, bei $85\,\mathrm{K}$

Ballistische Spininjektion in reines Silizium



- Reines Si als Spintransportmedium
- Ballistische Injektion „heißer“ Elektronen durch ferromagnetische dünne Filme
- Dies vermeidet Probleme der unterschiedlichen Leitfähigkeiten
- Der glatte Kollektorstrom (Abb. b) zeigt die elektrische Kontrolle der Spinpräzession an
  $\Rightarrow$ Spinkohärente Drift der Leitungselektronen in Si (Appelbaum et al., 2007)

Die spinaufgelöste XAS

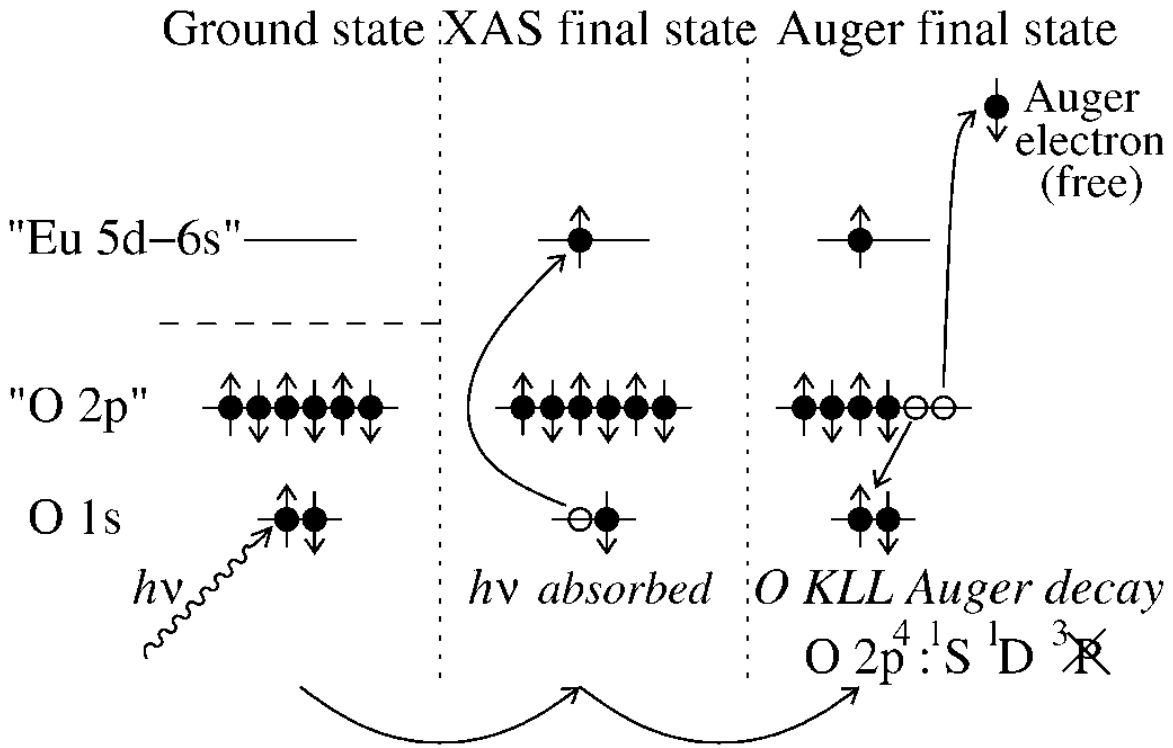


Abbildung: Der Spin des herausfliegenden $O\ KL_{23}L_{23}$ Auger-Elektrons (rechts) ist entgegengesetzt dem bereits durch das Röntgenphoton angeregten Elektron (Mitte und rechts). Aus der Beobachtung schließt man auf ein $|\uparrow\rangle$-Elektron im Leitungsband. (Steeneken, Tjeng, et al. 2001)

Literaturverzeichnis

I. Appelbaum, et al., *Nature* **447**, S. 295 (2007)

D.D. Awschalom und M.E. Flatté, *Nature* **3**, S. 153 (2007)

I. Žutić und J. Fabian, *Nature* **447**, S. 269 (2007)

R. Winkler und M. Oestreich, *Physik Journal* **11**, S. 39 (2004)

I. Žutić, et al., *Rev. Mod. Phys.* **76**, S. 323 (2004)

P.G. Steeneken, L.H. Tjeng, et al., *Phys. Rev. Let.* **4**, S. 47201 (2002)

D.D. Awschalom, et al., *Scientific American* **6** , S. 53 (2002)

S.A. Wolf, et al., *Science* **294**, S. 1488 (2001)

W. Weber, et al., *Science* **291**, S. 1015 (2001)

J.M. Kikkawa, et al., *Physica* **E 9**, S. 194 (2001)

E.B. Myers, et al., *Science* **285**, S. 867 (1999)