

Übergangsmetallcluster

1.01 1 H Hydrogen 1.008 $1s^1$																4.00 2 He Helium 4.003 $1s^2$			
6.94 3 Li Lithium 6.941 $[He] 2s^1$	9.01 4 Be Beryllium 9.012 $[He] 2s^2$													10.81 5 B Boron 10.811 $[He] 2s^2 2p^1$	12.01 6 C Carbon 12.011 $[He] 2s^2 2p^2$	14.01 7 N Nitrogen 14.007 $[He] 2s^2 2p^3$	16.00 8 O Oxygen 15.999 $[He] 2s^2 2p^4$	19.00 9 F Fluorine 18.998 $[He] 2s^2 2p^5$	20.18 10 Ne Neon 20.180 $[He] 2s^2 2p^6$
22.99 11 Na Sodium 22.990 $[Ne] 3s^1$	24.31 12 Mg Magnesium 24.305 $[Ne] 3s^2$													26.98 13 Al Aluminum 26.982 $[Ne] 3s^2 3p^1$	28.09 14 Si Silicon 28.086 $[Ne] 3s^2 3p^2$	30.97 15 P Phosphorus 30.974 $[Ne] 3s^2 3p^3$	32.07 16 S Sulfur 32.065 $[Ne] 3s^2 3p^4$	35.45 17 Cl Chlorine 35.453 $[Ne] 3s^2 3p^5$	39.95 18 Ar Argon 39.948 $[Ne] 3s^2 3p^6$
39.10 19 K Potassium 39.098 $[Ar] 4s^1$	40.08 20 Ca Calcium 40.078 $[Ar] 4s^2$	44.96 21 Sc Scandium 44.956 $[Ar] 3d^1 4s^2$	47.88 22 Ti Titanium 47.883 $[Ar] 3d^2 4s^2$	50.94 23 V Vanadium 50.942 $[Ar] 3d^3 4s^2$	52.00 24 Cr Chromium 52.004 $[Ar] 3d^5 4s^1$	54.94 25 Mn Manganese 54.938 $[Ar] 3d^5 4s^2$	55.85 26 Fe Iron 55.845 $[Ar] 3d^6 4s^2$	58.93 27 Co Cobalt 58.933 $[Ar] 3d^7 4s^2$	58.69 28 Ni Nickel 58.693 $[Ar] 3d^8 4s^2$	63.55 29 Cu Copper 63.546 $[Ar] 3d^10 4s^1$	65.39 30 Zn Zinc 65.38 $[Ar] 3d^10 4s^2$	69.72 31 Ga Gallium 69.723 $[Ar] 3d^10 4s^2 4p^1$	72.61 32 Ge Germanium 72.631 $[Ar] 3d^10 4s^2 4p^2$	74.92 33 As Arsenic 74.922 $[Ar] 3d^10 4s^2 4p^3$	78.96 34 Se Selenium 78.96 $[Ar] 3d^10 4s^2 4p^4$	79.90 35 Br Bromine 79.904 $[Ar] 3d^10 4s^2 4p^5$	83.80 36 Kr Krypton 83.80 $[Ar] 3d^10 4s^2 4p^6$		
85.47 37 Rb Rubidium 85.468 $[Kr] 5s^1$	87.62 38 Sr Strontium 87.62 $[Kr] 5s^2$	88.91 39 Y Yttrium 88.906 $[Kr] 4d^1 5s^2$	91.22 40 Zr Zirconium 91.224 $[Kr] 4d^2 5s^2$	92.91 41 Nb Niobium 92.906 $[Kr] 4d^4 5s^1$	95.94 42 Mo Molybdenum 95.94 $[Kr] 4d^5 5s^1$	97.91 43 Tc Technetium 97.907 $[Kr] 4d^6 5s^1$	101.07 44 Ru Ruthenium 101.07 $[Kr] 4d^7 5s^1$	102.91 45 Rh Rhodium 102.906 $[Kr] 4d^8 5s^1$	106.42 46 Pd Palladium 106.42 $[Kr] 4d^10$	107.87 47 Ag Silver 107.868 $[Kr] 4d^10 5s^1$	112.41 48 Cd Cadmium 112.415 $[Kr] 4d^10 5s^2$	114.82 49 In Indium 114.818 $[Kr] 4d^10 5s^2 5p^1$	118.71 50 Sn Tin 118.710 $[Kr] 4d^10 5s^2 5p^2$	121.76 51 Sb Antimony 121.76 $[Kr] 4d^10 5s^2 5p^3$	127.60 52 Te Tellurium 127.603 $[Kr] 4d^10 5s^2 5p^4$	126.90 53 I Iodine 126.905 $[Kr] 4d^10 5s^2 5p^5$	131.29 54 Xe Xenon 131.29 $[Kr] 4d^10 5s^2 5p^6$		
132.91 55 Cs Cesium 132.905 $[Xe] 6s^1$	137.33 56 Ba Barium 137.327 $[Xe] 6s^2$	174.97 71 Lu Lutetium 174.967 $[Xe] 4f^14 5d^1 6s^2$	178.49 72 Hf Hafnium 178.49 $[Xe] 4f^14 5d^2 6s^2$	180.95 73 Ta Tantalum 180.948 $[Xe] 4f^14 5d^3 6s^2$	183.84 74 W Tungsten 183.84 $[Xe] 4f^14 5d^4 6s^2$	186.21 75 Re Rhenium 186.207 $[Xe] 4f^14 5d^5 6s^2$	190.23 76 Os Osmium 190.23 $[Xe] 4f^14 5d^6 6s^2$	192.22 77 Ir Iridium 192.222 $[Xe] 4f^14 5d^7 6s^2$	195.08 78 Pt Platinum 195.084 $[Xe] 4f^14 5d^9 6s^1$	196.97 79 Au Gold 196.967 $[Xe] 4f^14 5d^10 6s^1$	200.59 80 Hg Mercury 200.59 $[Xe] 4f^14 5d^10 6s^2$	204.38 81 Tl Thallium 204.38 $[Xe] 4f^14 5d^10 6s^2 6p^1$	207.20 82 Pb Lead 207.2 $[Xe] 4f^14 5d^10 6s^2 6p^2$	208.98 83 Bi Bismuth 208.98 $[Xe] 4f^14 5d^10 6s^2 6p^3$	208.98 84 Po Polonium 209 $[Xe] 4f^14 5d^10 6s^2 6p^4$	209.99 85 At Astatine 210 $[Xe] 4f^14 5d^10 6s^2 6p^5$	222.02 86 Rn Radon 222 $[Xe] 4f^14 5d^10 6s^2 6p^6$		
223.02 87 Fr Francium 223 $[Ra] 7s^1$	226.03 88 Ra Radium 226.025 $[Ra] 7s^2$	262.11 103 Lr Lawrencium 262 $[Og] 5f^14 6d^1 7s^2 7p^1$	[261] 104 Rf Rutherfordium n/a $[Og] 5f^14 6d^2 7s^2$	[262] 105 Db Dubnium n/a $[Og] 5f^14 6d^3 7s^2$	[266] 106 Sg Seaborgium n/a $[Og] 5f^14 6d^4 7s^2$	[264] 107 Bh Bohrium n/a $[Og] 5f^14 6d^5 7s^2$	[269] 108 Hs Hassium n/a $[Og] 5f^14 6d^6 7s^2$	[268] 109 Mt Meitnerium n/a $[Og] 5f^14 6d^7 7s^2$	[269] 110 Uun Ununnilium n/a $[Og] 5f^14 6d^9 7s^1$	[272] 111 Uuu Unununium n/a $[Og] 5f^14 6d^10 7s^1$	[277] 112 Uub Ununbium n/a $[Og] 5f^14 6d^10 7s^2$								

A
Z
S
Y
Symbol
[1]
[2]
e-conf ig

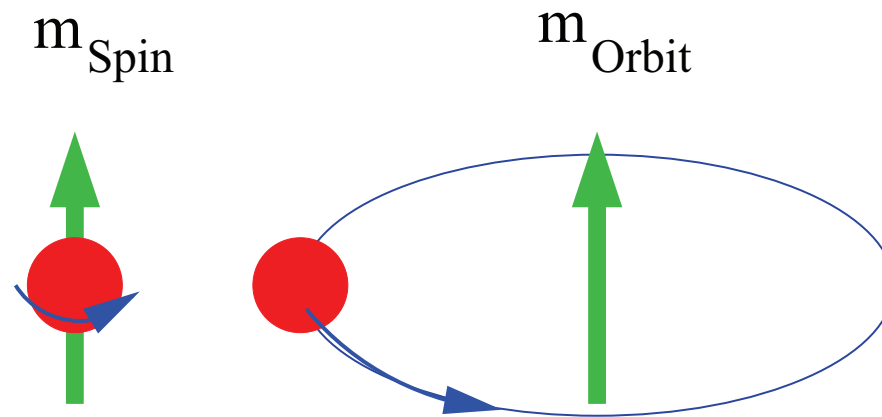
138.91 57 La Lanthanum 138.905 $[Xe] 6d^1 5d^0$	140.12 58 Ce Cerium 140.12 $[Xe] 4f^1 5d^0 6s^2$	140.91 59 Pr Praseodymium 140.908 $[Xe] 4f^3 6s^2$	144.24 60 Nd Neodymium 144.242 $[Xe] 4f^4 6s^2$	144.91 61 Pm Promethium 144.913 $[Xe] 4f^5 6s^2$	150.36 62 Sm Samarium 150.36 $[Xe] 4f^6 6s^2$	151.97 63 Eu Europium 151.965 $[Xe] 4f^7 6s^2$	157.25 64 Gd Gadolinium 157.254 $[Xe] 4f^7 5d^1 6s^2$	158.93 65 Tb Terbium 158.925 $[Xe] 4f^9 6s^2$	162.50 66 Dy Dysprosium 162.50 $[Xe] 4f^10 6s^2$	164.93 67 Ho Holmium 164.931 $[Xe] 4f^11 6s^2$	167.26 68 Er Erbium 167.259 $[Xe] 4f^12 6s^2$	168.93 69 Tm Thulium 168.931 $[Xe] 4f^13 6s^2$	173.04 70 Yb Ytterbium 173.045 $[Xe] 4f^14 6s^2$
227.03 89 Ac Actinium 227 $[Rn] 6d^1 7s^2$	232.04 90 Th Thorium 232.038 $[Rn] 6d^2 7s^2$	231.04 91 Pa Protactinium 231.036 $[Rn] 5f^2 6d^1 7s^2$	238.03 92 U Uranium 238.029 $[Rn] 5f^3 6d^1 7s^2$	237.05 93 Np Neptunium 237.048 $[Rn] 5f^6 7s^2$	244.06 94 Pu Plutonium 244.064 $[Rn] 5f^7 7s^2$	243.06 95 Am Americium 243.061 $[Rn] 5f^7 7s^2$	247.07 96 Cm Curium 247.07 $[Rn] 5f^9 7s^2$	247.07 97 Bk Berkelium n/a $[Rn] 5f^9 7s^2$	251.08 98 Cf Californium 251.083 $[Rn] 5f^10 7s^2$	252.08 99 Es Einsteinium 252.085 $[Rn] 5f^11 7s^2$	257.10 100 Fm Fermium 257.103 $[Rn] 5f^12 7s^2$	258.10 101 Md Mendelevium 258.108 $[Rn] 5f^13 7s^2$	259.10 102 No Nobelium 259.108 $[Rn] 5f^14 7s^2$

Übergangsmetallcluster

- Übergangsmetalle und deren Verbindungen gehören zu den wichtigsten Materialien in technologischen Anwendungen
- Sie besitzen i.A. eine sehr komplexe elektronische Struktur aufgrund offener Schalen
 - Übergangsmetalle: Auffüllen der 3d, 4d, 4f Schale
 - Lanthanide, Actinide: Auffüllen der 4f bzw. 5f Schale
- Einfaches Jellium Modell liefert typisch keine guten Ergebnisse mehr, da das Modell eines freien Elektronengases kein geeignetes Modell mehr ist.
 - Über den Cluster delokalisierte *s* Elektronen
 - *d* Elektronen sind eher lokalisiert
- Besondere Eigenschaften
 - 3d-Metalle: Eisen, Kobalt, Nickel sind Ferromagneten
 - Edelmetalle wie Platin und Paladium werden häufig als Katalysatoren verwendet
 - Metalle wie z.B. Niob zeigen Supraleitung

Atomarer Magnetismus

- Hund'sche Regel:
Grundzustand hat einen maximalen Spin
- Spin und Bahnmagnetismus



$$m_s = g_s S_z \mu_B = 2 S_z \mu_B = 2 S_z \frac{e\hbar}{2m_e} \quad (133)$$

$$m_B = L_z \mu_B \quad (134)$$

3d Atome



Gesamtmomente aller 3d Metallatome in μ_B

Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu
$3d^1 4s^2$	$3d^2 4s^2$	$3d^3 4s^2$	$3d^5 4s^1$	$3d^5 4s^2$	$3d^6 4s^2$	$3d^7 4s^2$	$3d^9 4s^2$	$3d^{10} 4s^1$
1	2	3	6	5	4	3	2	1

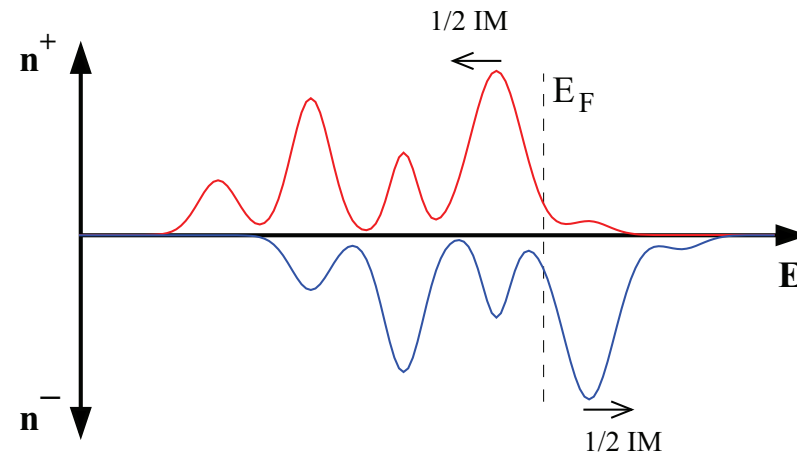
Magnetismus im Festkörper

- Magnetismus im Festkörper wird durch eine Ausrichtung der einzelnen atomaren magnetischen Momente verursacht
- Weiß'sche Bezirke in Ferromagneten enthalten typisch $10^5 - 10^6$ Atome
- Für kleine Cluster ist also ein Eindomänenverhalten zu erwarten
- Beschreibung des Magnetismus in einem Heisenbergmodell

$$\mathcal{H}_H = \sum A \vec{s}_i \cdot \vec{s}_j \quad (135)$$

- Spin-Spin Kopplung
 - Vernachlässigung der nächste-Nachbar Wechselwirkung
- Gesamtmagnetismus $M = n \cdot \mu$

Magnetismus im Festkörper – Zustandsdichte

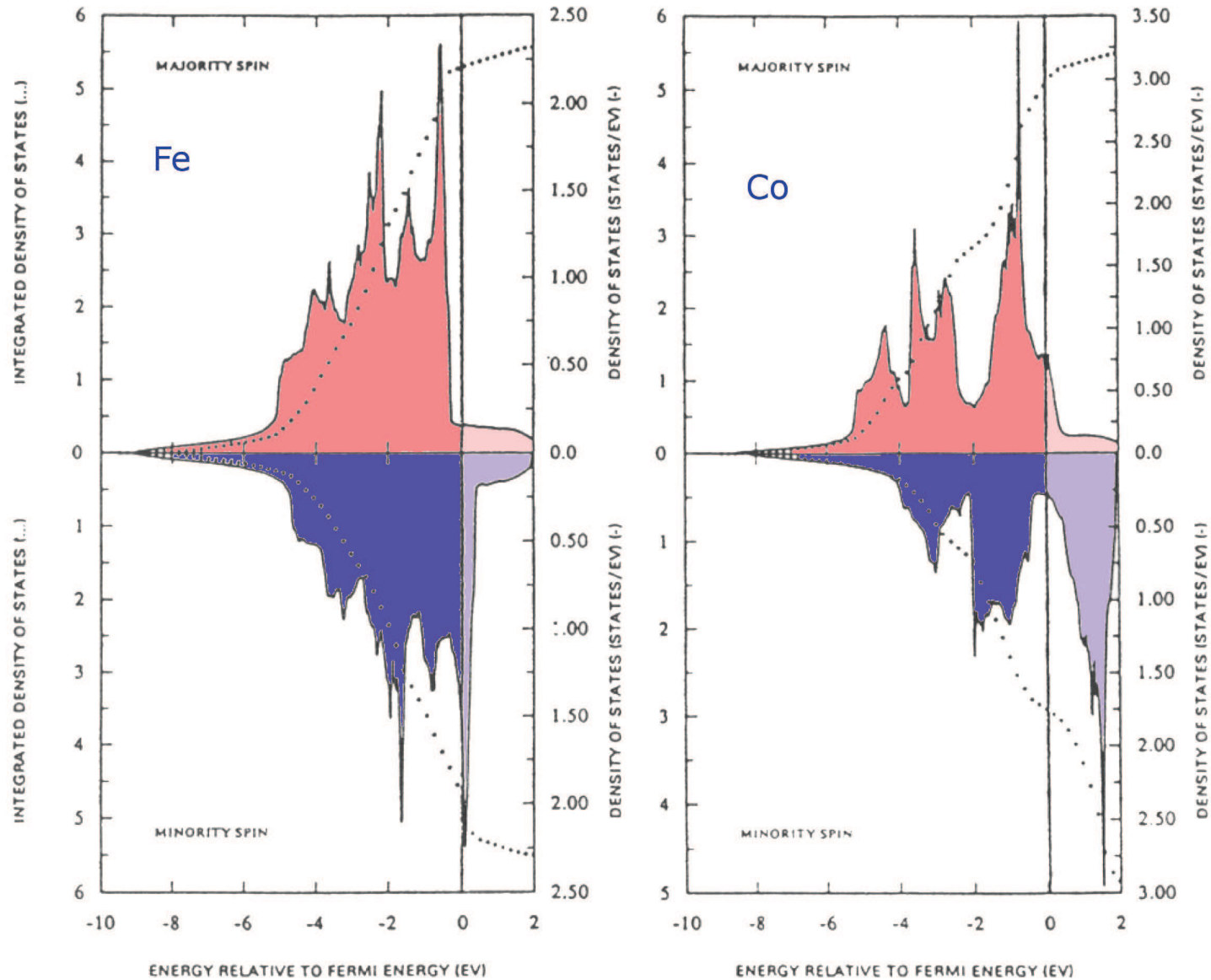


- Modell des itineranten Magnetismus für die 3d Ferromagneten Fe, Co und Ni
- Magnetismus wird durch die delokalisierten 3d Elektronen verursacht → Stoner Kriterium

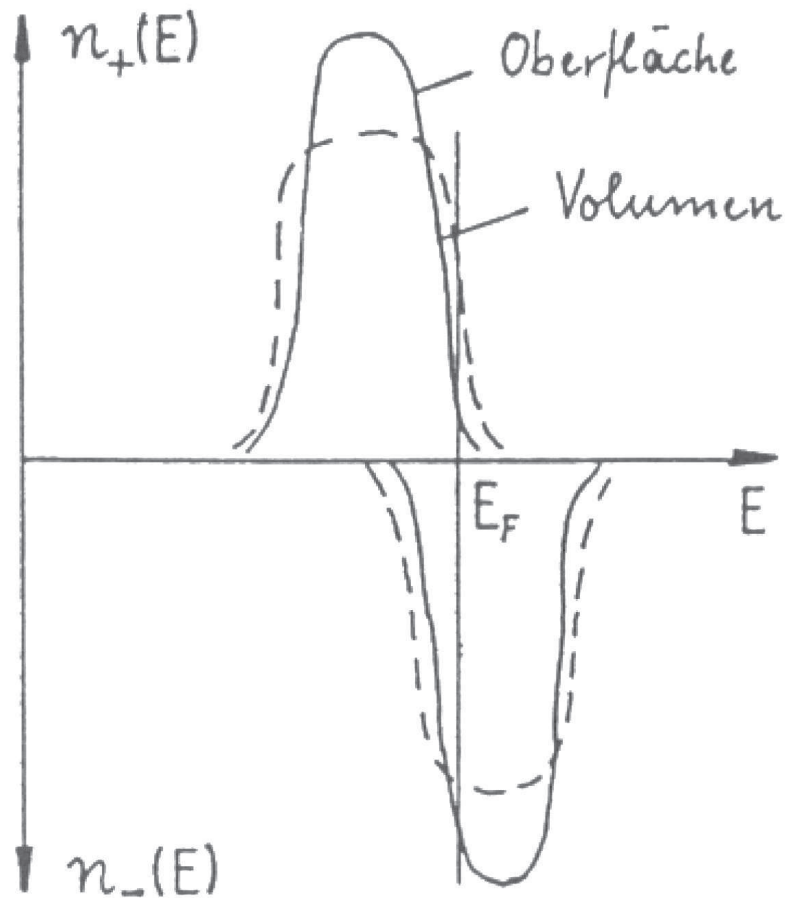
$$n_0(E_F) \cdot I > 1 \quad (136)$$

- Ferromagnetismus, wenn das Produkt aus der Zustandsdichte an der Fermi-Kante $n_0(E_F)$ und dem Austauschintegral I größer als 1 ist.

Magnetismus im Festkörper – Ferromagnetismus



Magnetismus im Festkörper – Koordination

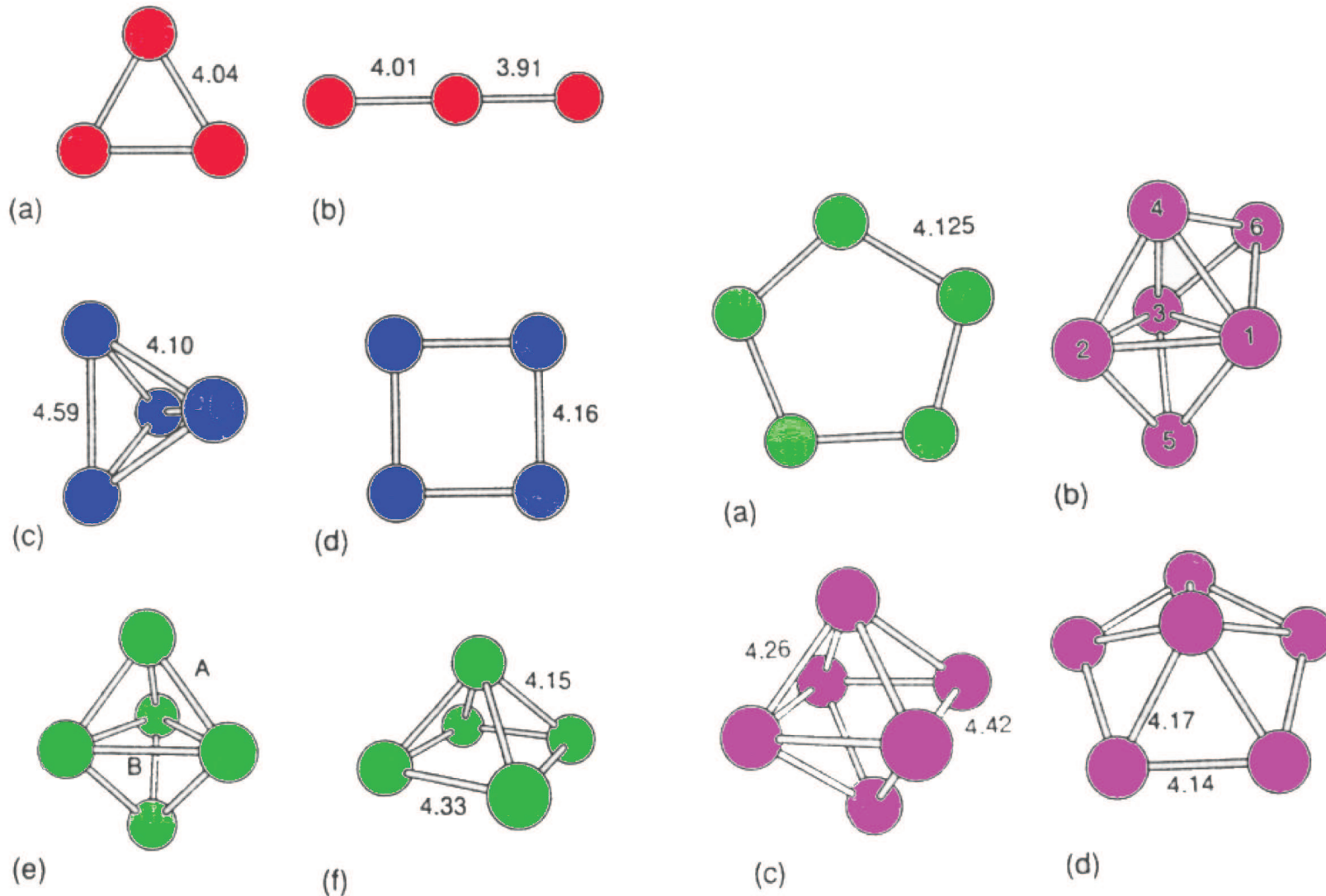


- Oberfläche vs. Bulk
- Koordination der Atome hat einen sehr großen Einfluß auf die elektronische Struktur an der Fermi Kante
- Insbesondere ändert sich die Bandbreite der d-Bänder

Fe (nur Spin)	Atom	Oberfläche	Festkörper
μ_B	4	2.9	2.15

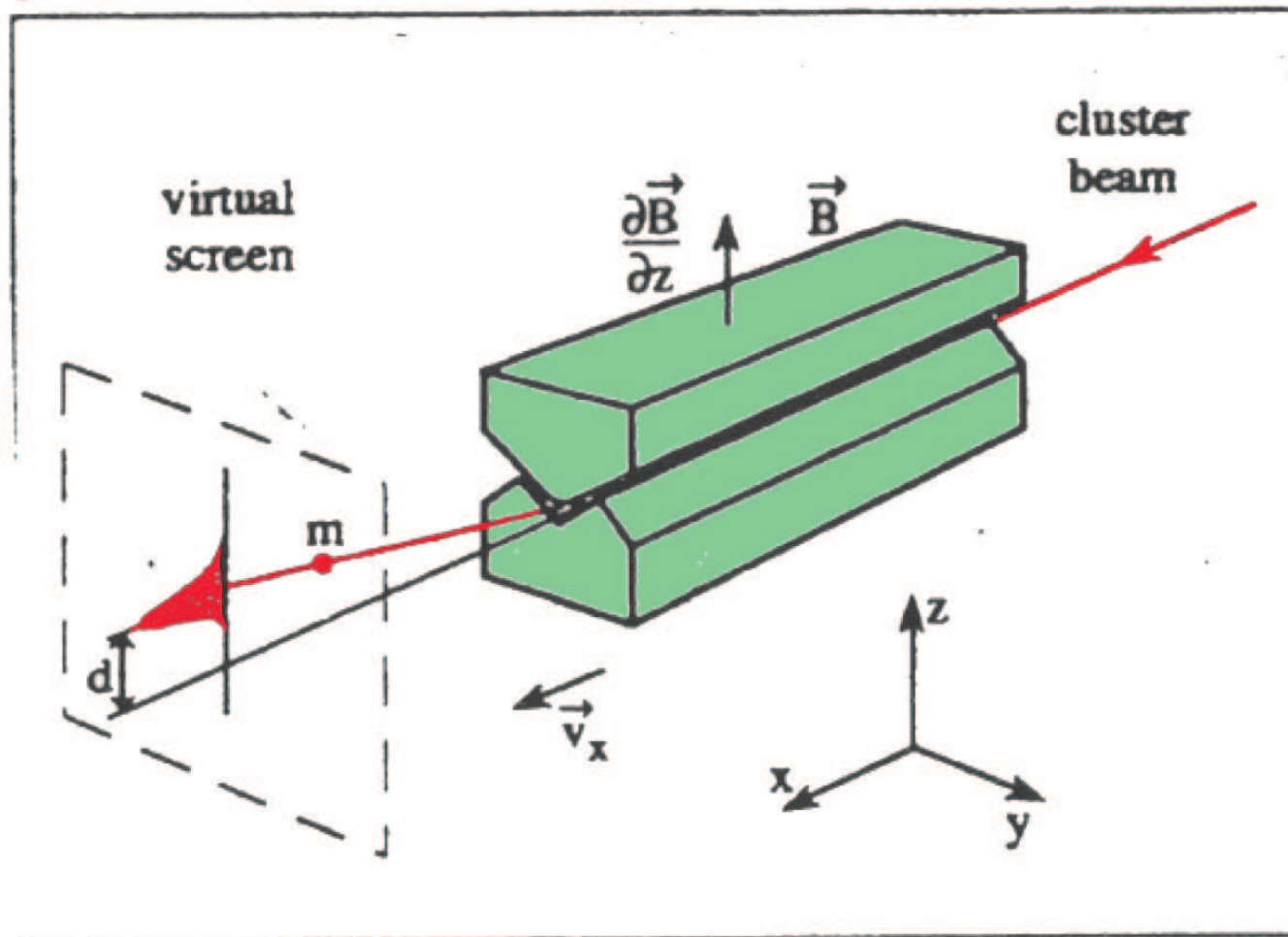
Magnetismus kleiner Cluster – Theorie

- Was wird für kleine Eisencluster erwartet ?

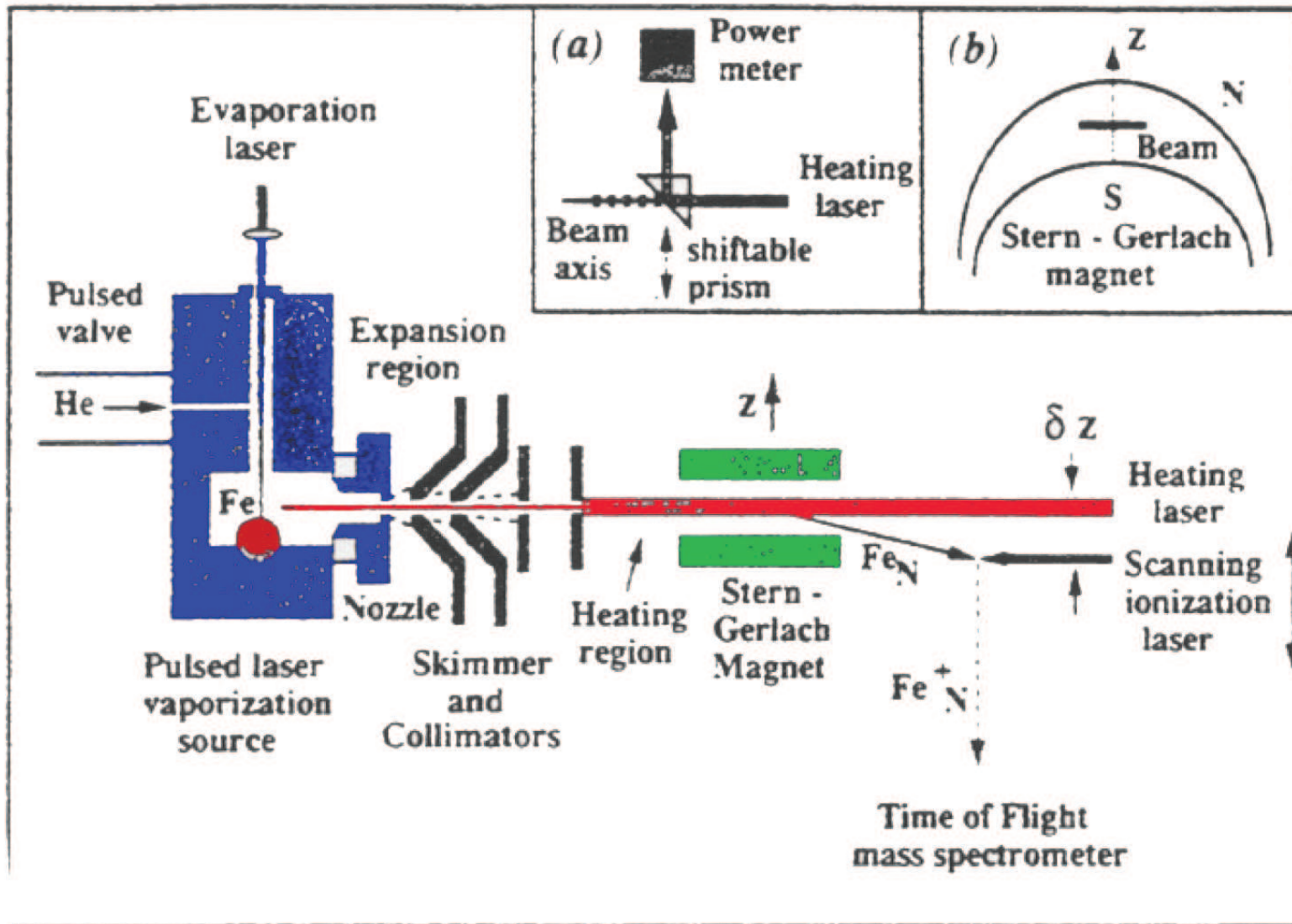


Magnetismus kleiner Cluster – Experiment

- Wie kann man die magnetischen Eigenschaften von kleinen Clustern messen ?
- Stern-Gerlach Aufbau



Magnetismus kleiner Cluster – Experiment



Magnetismus kleiner Cluster – Experiment

- Kraft im inhomogenen Magnetfeld auf den Cluster ist

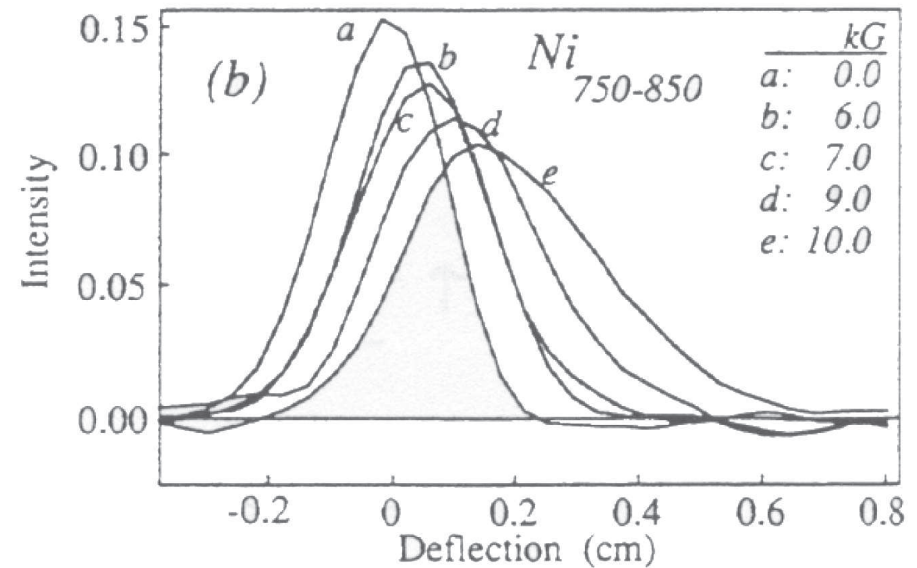
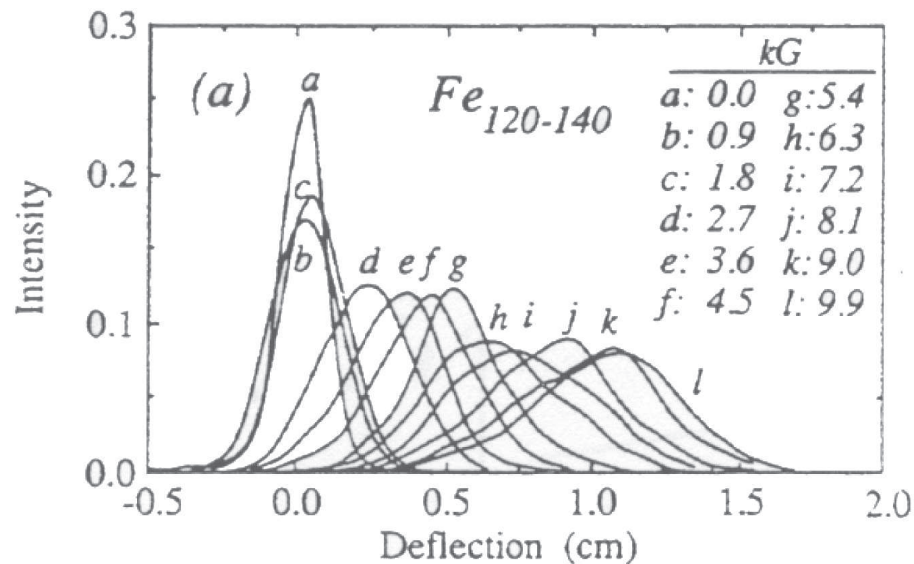
$$F_z = \mu_z \frac{\partial B}{\partial z} = m_s \mu_B \frac{\partial B}{\partial z} \quad (137)$$

- Ablenkung d der Cluster im Magnetfeld

$$d = K \frac{\mu_z}{mv^2} \cdot \frac{\partial B}{\partial z} \quad (138)$$

K: Geometriekonstante

Magnetismus kleiner Cluster – Experiment



- Cluster werden im Magnetfeld abhängig von ihrer Magnetisierung M abgelenkt
- Ionisation der Cluster mittels eines Laser im Abstand d
- Massenselektion der Cluster mit einem Flugzeitmassenspektrometer
- Superparamagnetisches Verhalten der Cluster

Superparamagnetismus

- Alle magnetischen Momente der einzelnen Clusteratome sind relativ zueinander ausgerichtet, aber das gesamte Clustermoment verhält sich paramagnetisch
- Fluktuation des Gesamtmomentes aufgrund von thermischen Bewegungen
- Ausrichtung der magnetischen Cluster durch ein externes Feld B

$$\mu_{\text{eff}} = \mu (\cosh(N\mu B/kT) - kT/N\mu B) \quad (139)$$

$$\propto N\mu^2 B/3kT \text{ für } N\mu B/kT \ll 1 \quad (140)$$

Langevin Formel, $\mu_B = 9 \cdot 10^{-24}$ J/T

- Bestimmung von μ aus einem Fit bei verschiedene Magnetfeldern bzw. Temperaturen

Superparamagnetismus

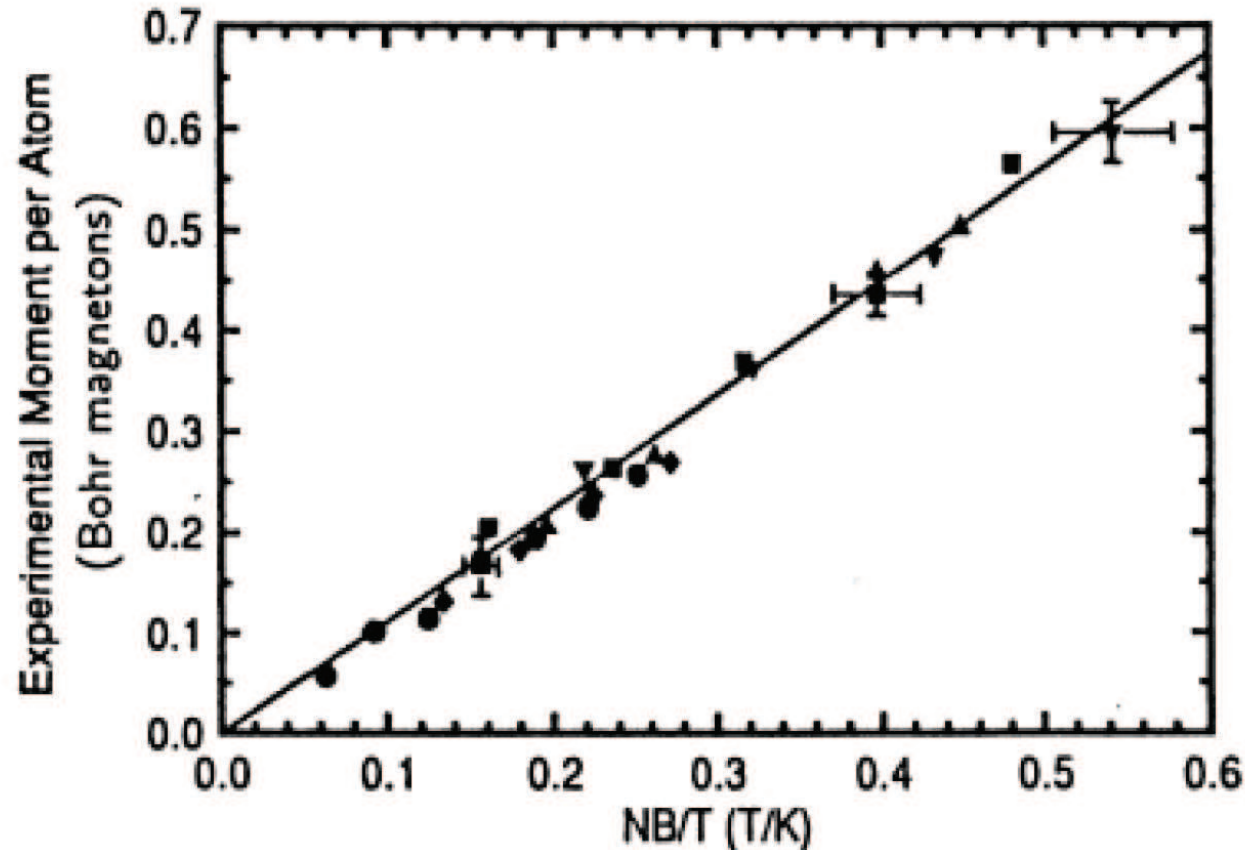
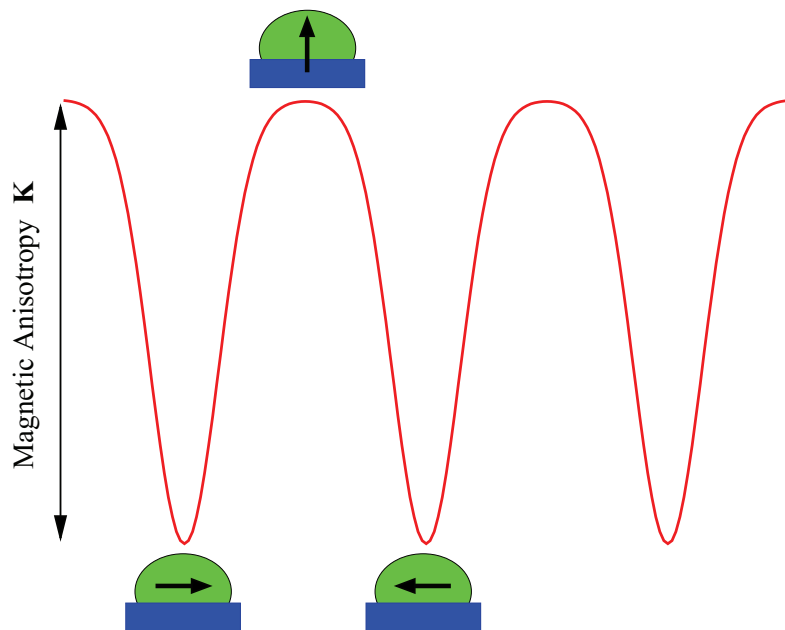


Fig. 4.10. Experimental magnetic moment per atom versus NB/T . The data points are \blacktriangle : Co_{115} , $B = 0.335$ tesla, $T = 40 \div 250$ K; \blacktriangledown : Co_{157} , $B = 0.14 \div 0.34$ tesla, $T = 97$ K; \blacksquare : Co_{115} , $B = 0.14 \div 0.4$ tesla, $T = 97$ K; \blacklozenge : Co_{65} , $B = 0.14 \div 0.4$ tesla, $T = 97$ K; \bullet : Co_{115} , $B = 0.14 \div 0.54$ tesla, $T = 97$ K. Note that the line of a least-squares fit passes through the origin [4.17]

Magnetische Anisotropie

- Wie wird aus Superparamagnetismus Ferromagnetismus ?
- Es muß eine Anisotropieenergie $K \cdot V$ geben, die die magnetischen Momente durch eine Kopplung an die geometrische Struktur stabilisiert
- Modell: Anisotropie ist mit dem Bahnmoment verknüpft, da der Spin nicht an die geometrische Struktur koppelt



Relaxation der Magnetisierung

- Nach der Ausrichtung im Magnetfeld werden die superparamagnetischen Cluster wieder relaxieren
- Dies ist ein thermisch aktivierter Prozeß, bei dem die Magnetisierung M mit der Zeit abfällt

$$M = M_s \exp -\frac{t}{\tau} \quad (141)$$

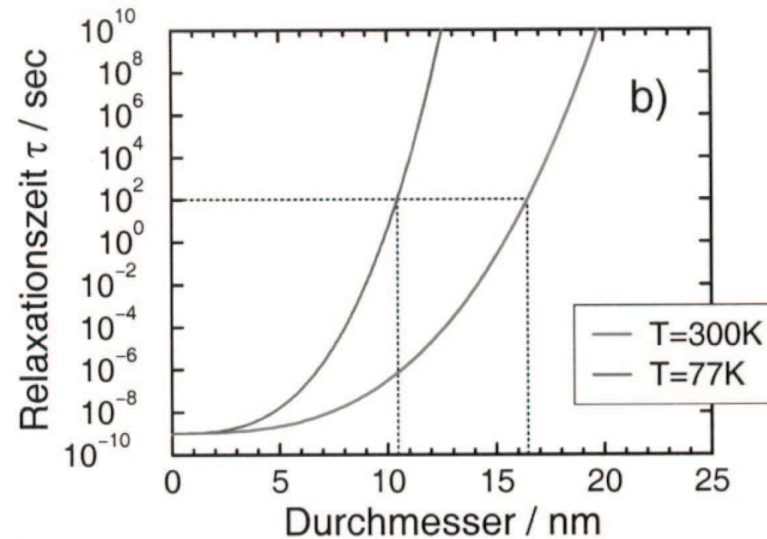
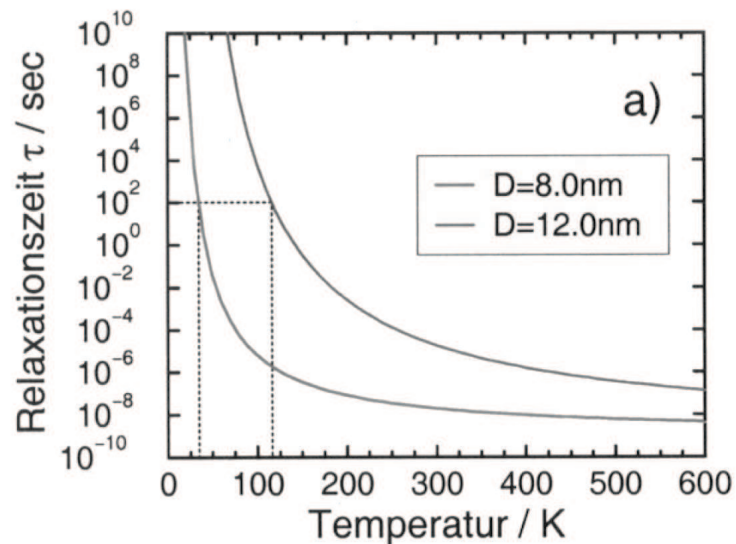
- Die Relaxationsrate τ hängt vom Volumen V , der Anisotropiekonstante K und der Temperatur T ab

$$\frac{1}{\tau} = f_0 \exp \left(\frac{KV}{k_B T} \right) \quad (142)$$

KV : Anisotropieenergie, $f_0 \approx 10^9 \text{ s}^{-1}$

- Volumenanisotropie von Eisen ist z.B. $K_1 = 4.5 \cdot 10^4 \text{ J/m}^3$

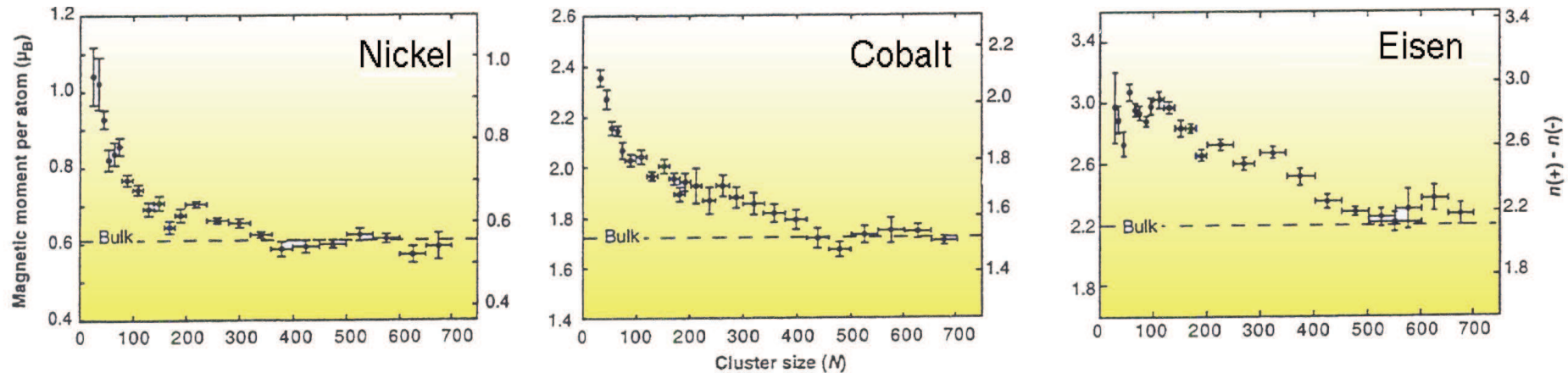
Relaxation der Magnetisierung



- Superparamagnetische Relaxationszeiten für Teilchen verschiedenen Größe D
- Bei **Blockingtemperaturen** von $T_B = 35\text{ K}$ bzw. $T_B = 116\text{ K}$ werden die Relaxationszeiten lang, so daß die Magnetisierungsrichtung als fest angesehen werden kann
- **Blockingvolumen** beträgt $d = 10.5\text{ nm}$ bzw. $d = 16.5\text{ nm}$

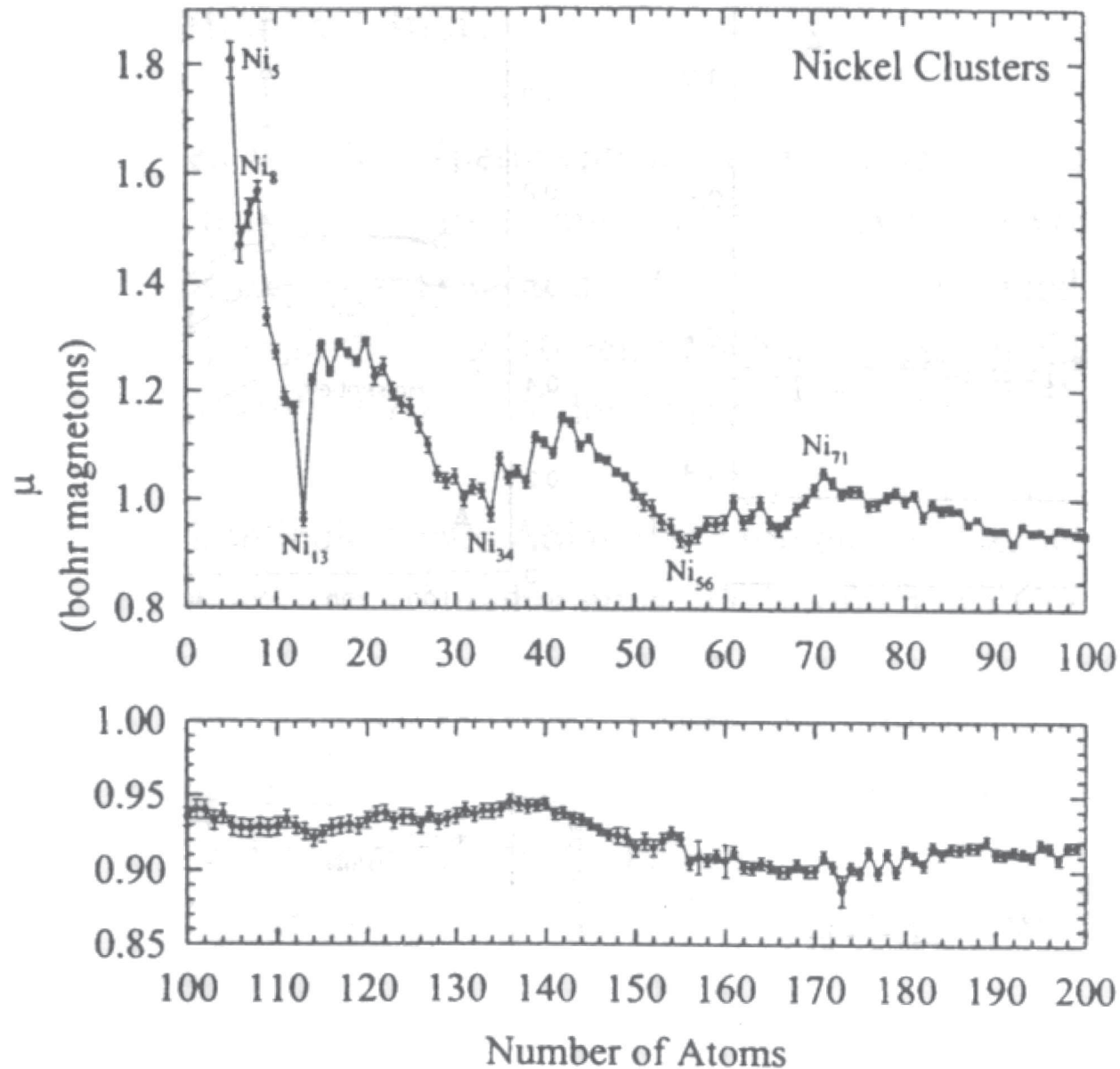
$$V_B = \frac{4\pi}{3} \cdot \frac{d^3}{8} \quad (143)$$

Größenabhängigkeit des Magnetismus



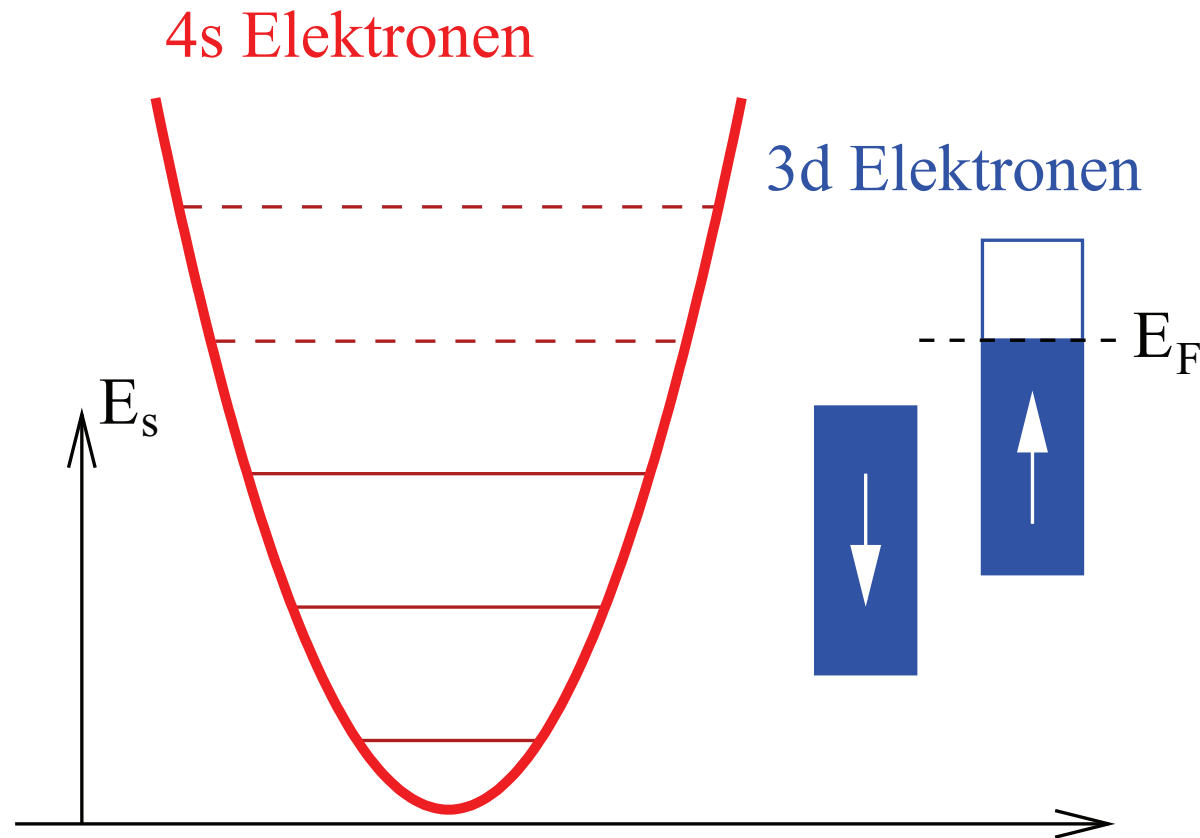
- Stark vergrößerte magnetische Momente der Cluster verglichen mit den Festkörpern
- Das magnetische Moment der Cluster ist stark größenabhängig
- Erst für $n \geq 500$ gehen die magnetischen Momente in die der Festkörper über
- Verhalten von Eisen bei $n = 600 - 700$ wird vermutlich durch eine Änderung der Gitterstruktur verursacht

Größenabhängigkeit des Magnetismus



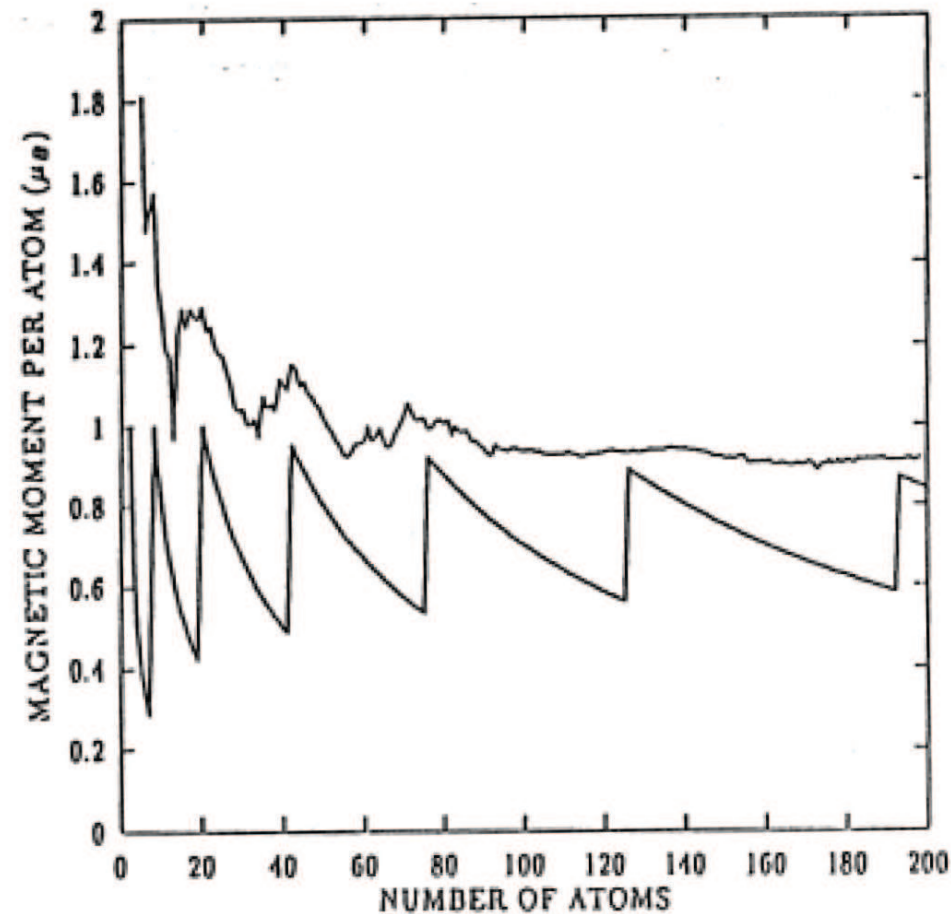
- Oszillierendes Verhalten der magnetischen Momente
- Erklärung durch Wechselwirkung der eher lokalisierten 3d Elektronen mit den delokalisierten 4s Elektronen

Größenabhängigkeit des Magnetismus



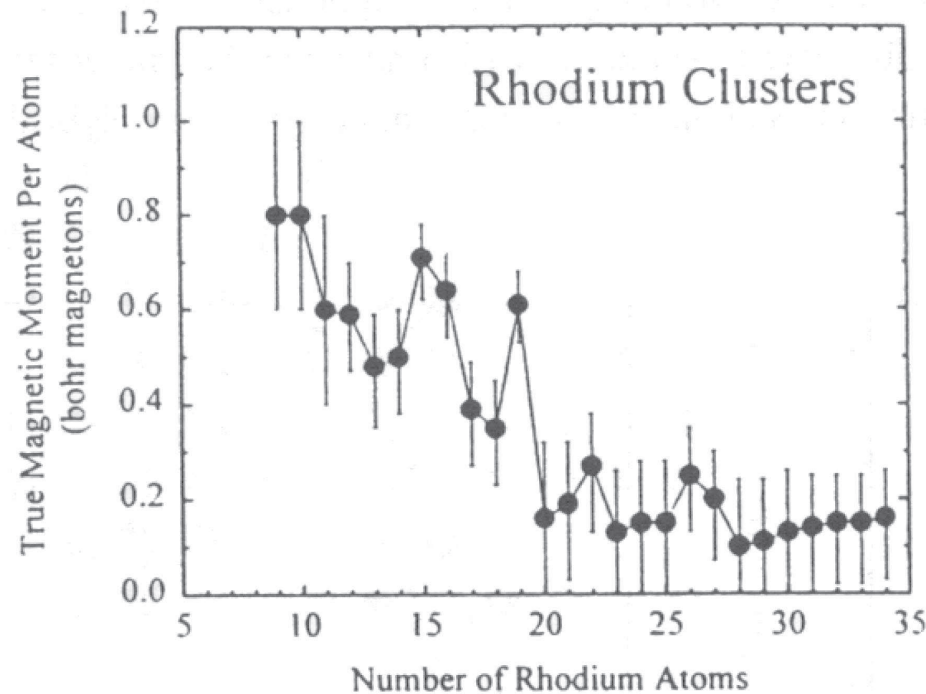
- Füllen der 4s Orbitale bewirkt eine Verschiebung der Fermi Energie E_F und damit eine Variation der Besetzung der 3d Zustände

Größenabhängigkeit des Magnetismus



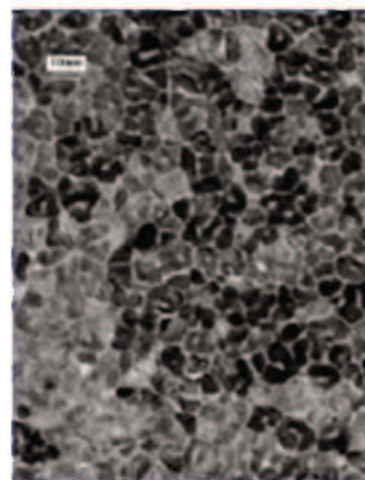
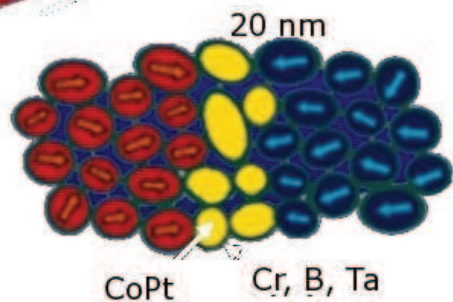
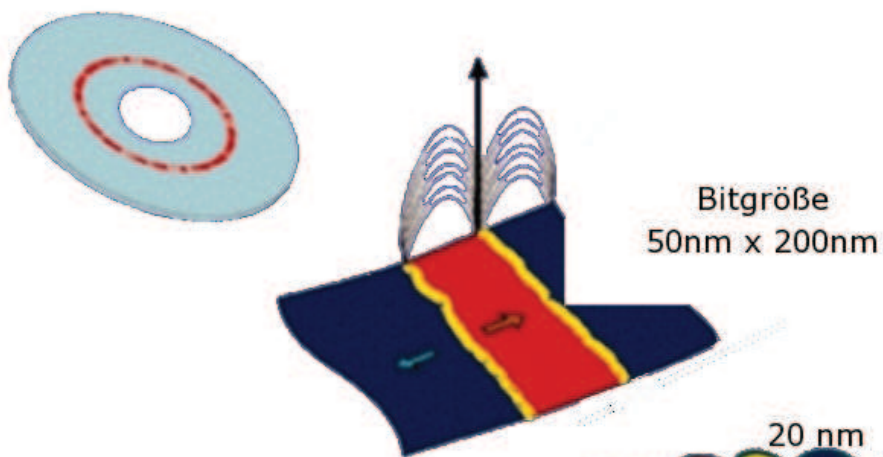
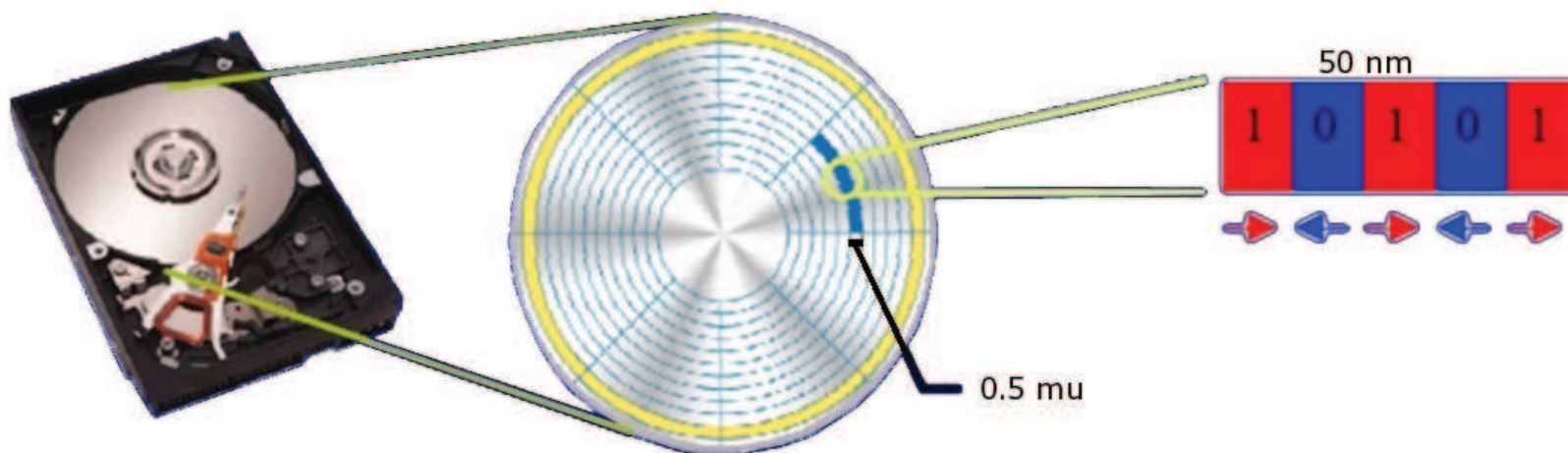
- Das einfache Modell mit einem harmonischen Potential für die 4s Elektronen beschreibt das Verhalten recht gut

Größenabhängigkeit des Magnetismus



- Als Cluster können auch Materialien magnetisch sein, die im Festkörper nicht ferromagnetisch sind
- Beispiel die den Fe, Co, Ni entsprechenden 4d Metalle Ru, Rh und Pd
- Pd erfüllt fast das Stoner Kriterium

Anwendung des Magnetismus



4.8 GBit/cm²

Einige hundert 100 nm Partikel pro Bit

Cluster auf Oberflächen

- Für Anwendungen müssen die Cluster auf einer Oberflächen deponiert werden
- Durch den Kontakt mit der Oberfläche können die Eigenschaften der freien Cluster stark modifiziert werden
- Um die Eigenschaften von deponierten Cluster zu studieren, müsse die massenselektierten Cluster aus der Gasphase auf einer Oberfläche zerstörungsfrei gelandet werden
 - Die typische Bindungsenergie von Cluster liegt im Bereich von 1-2 eV pro Atom
 - Um eine Fragmentation der Cluster beim Landen zu vermeiden müssen diese weich gelandet werden
 - *Soft Landing*

Soft Landing

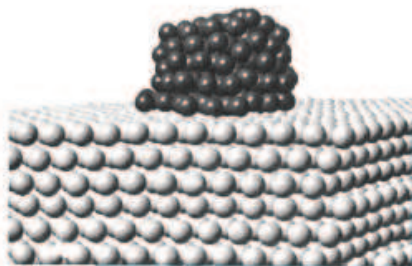
- Typische Realisierung des Softlandings von massenselektierten Clusterionen
 - Kinetische Energie der Cluster muß klein sein (≤ 1 eV pro Atom)
 - Landen der Cluster auf einem “weichem” Substrat
- Es dürfen nur wenige Cluster auf der Oberfläche sein, um ein Zusammenwachsen der massenselektierten Cluster zu verhindern
Typisch sind 3-4% einer Monolage
- Die Proben müssen kalt sein (< 40 K), um zu verhindern, das sich die Cluster auf der Oberfläche bewegen und dadurch zusammenwachsen

Hard Landing

- Deponieren eines Cu_{147} Cluster auf einer Oberfläche bei verschiedenen kinetischen Energien (Chen, Lanzman, J.Phys.Chem. **98**, 3527 (1994))

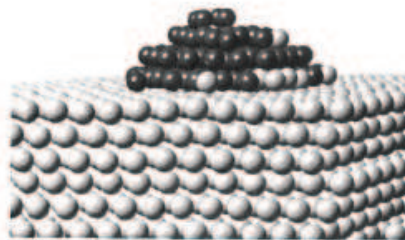
$v = 0.023 \text{ km/s}$

0.3 meV/Atom



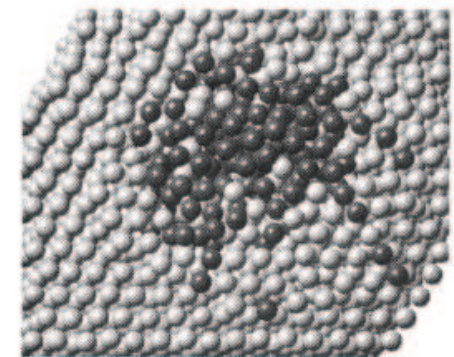
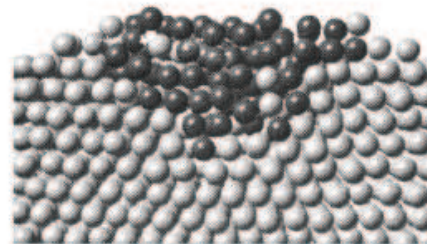
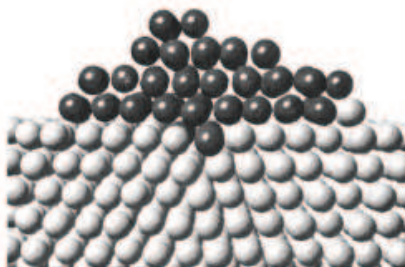
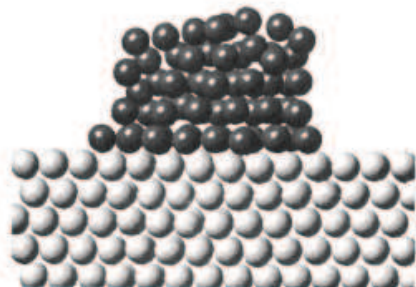
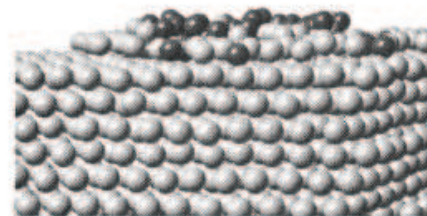
$v = 2 \text{ km/s}$

2.6 eV/Atom



$v = 4 \text{ km/s}$

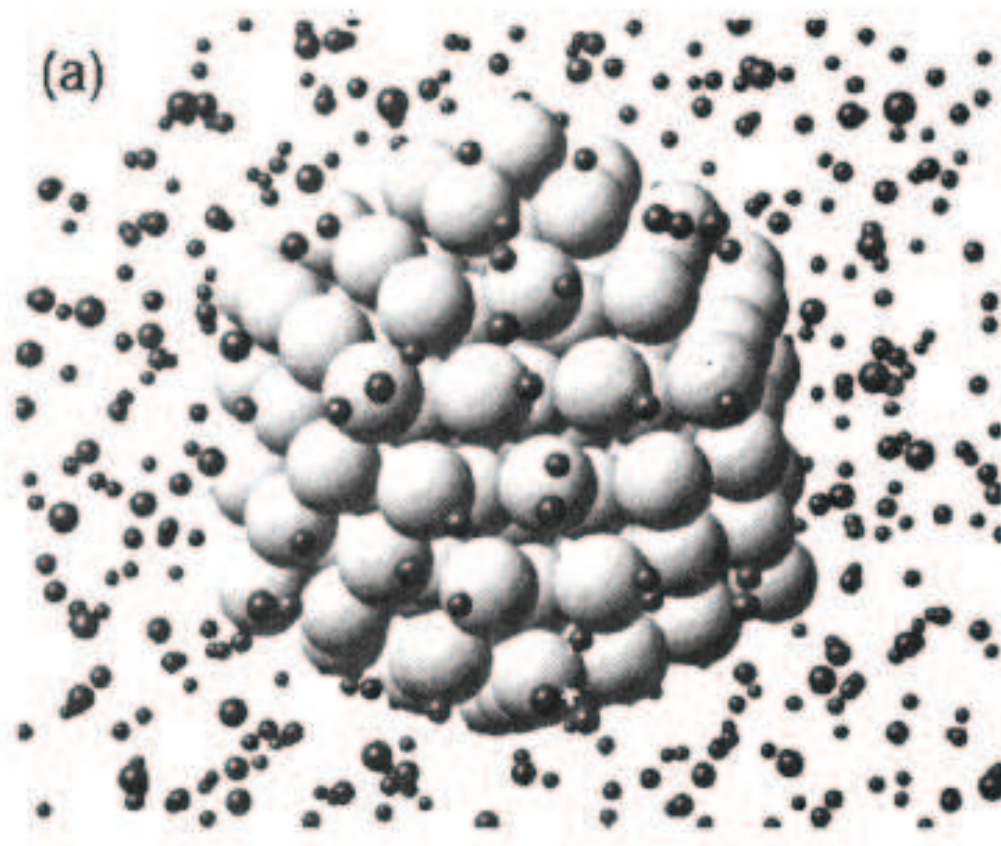
10 eV/Atom



Soft Landing

- Cu Cluster beim “eintauchen” in einen Argon Film

$v = 2 \text{ km/s}$

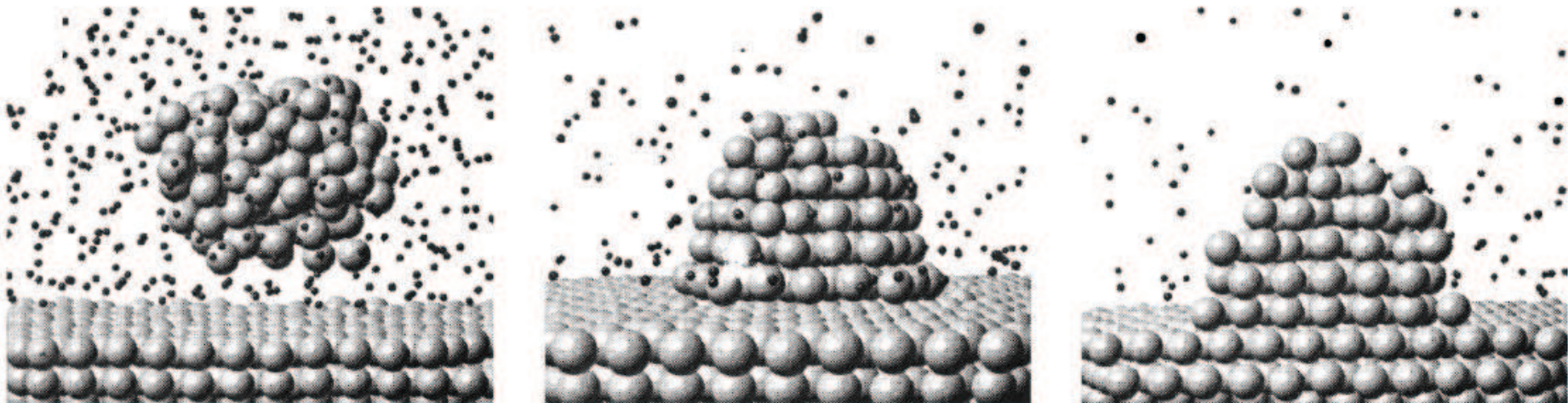


$v = 4 \text{ km/s}$



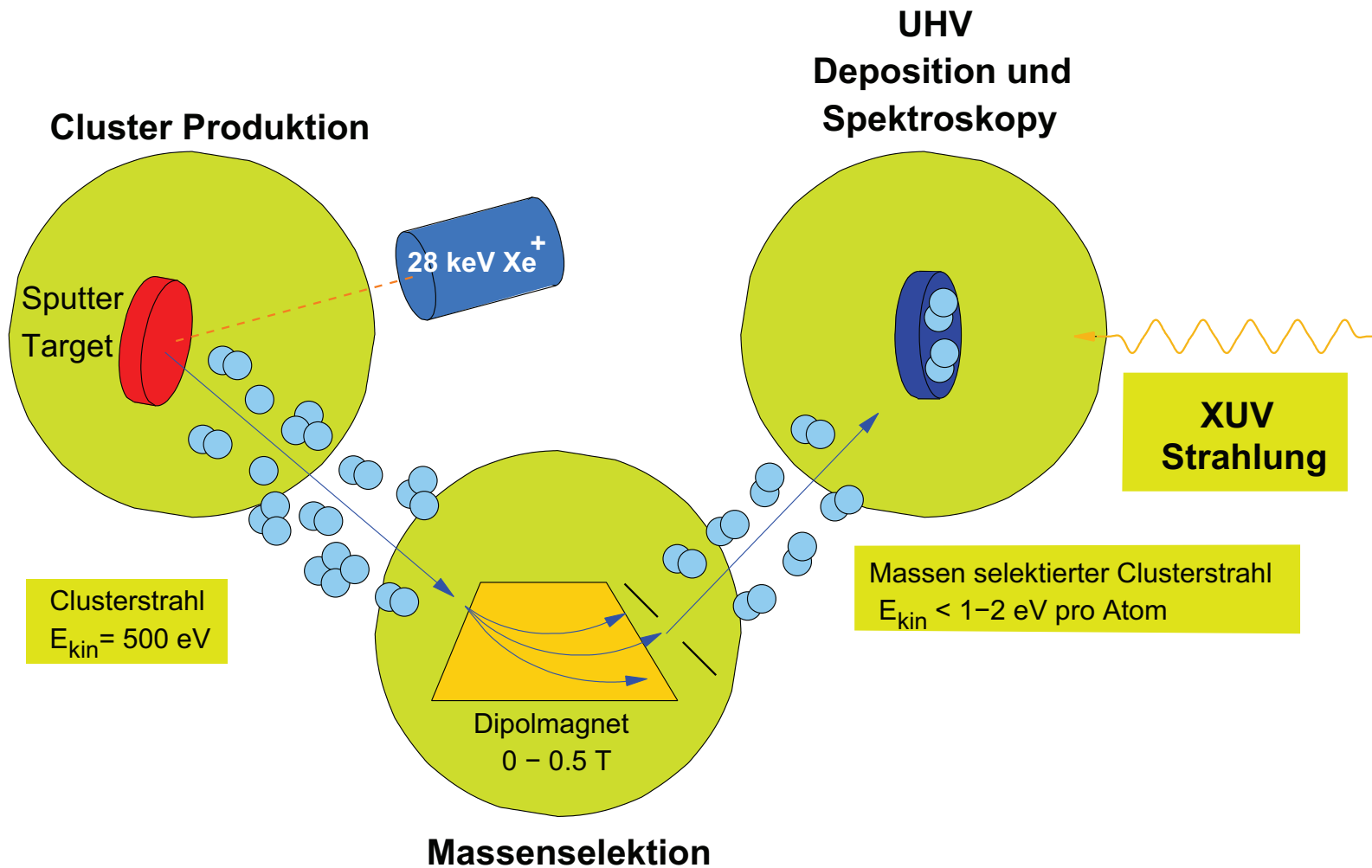
Soft Landing

- Deponieren eines Cu_{147} Cluster auf einer Oberfläche mit $v = 4 \text{ km/s}$
- Der Cluster wird nicht zerstört



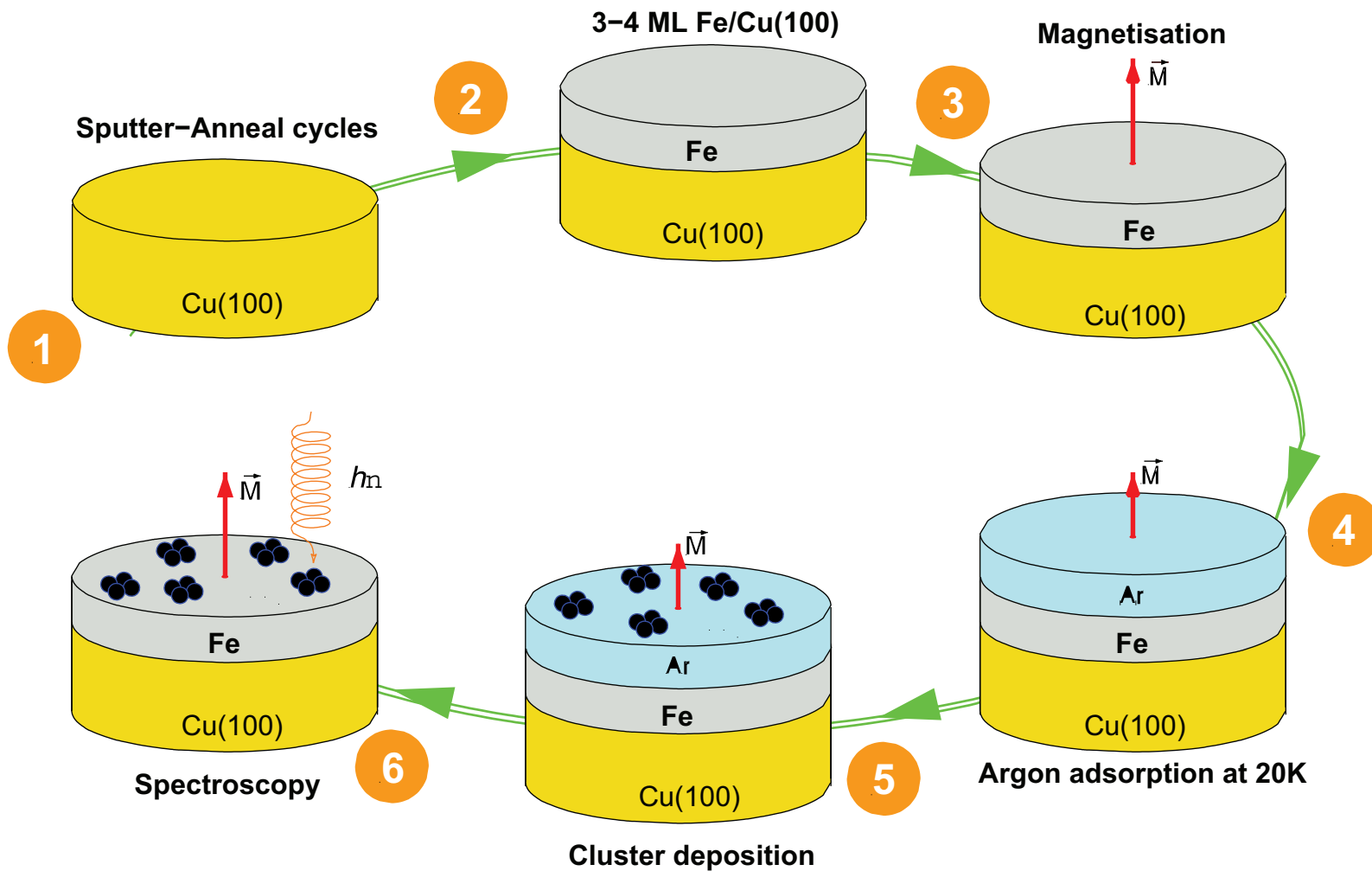
Soft Landing

- Apparatur zur Spektroskopie von deponierten Clustern



Soft Landing

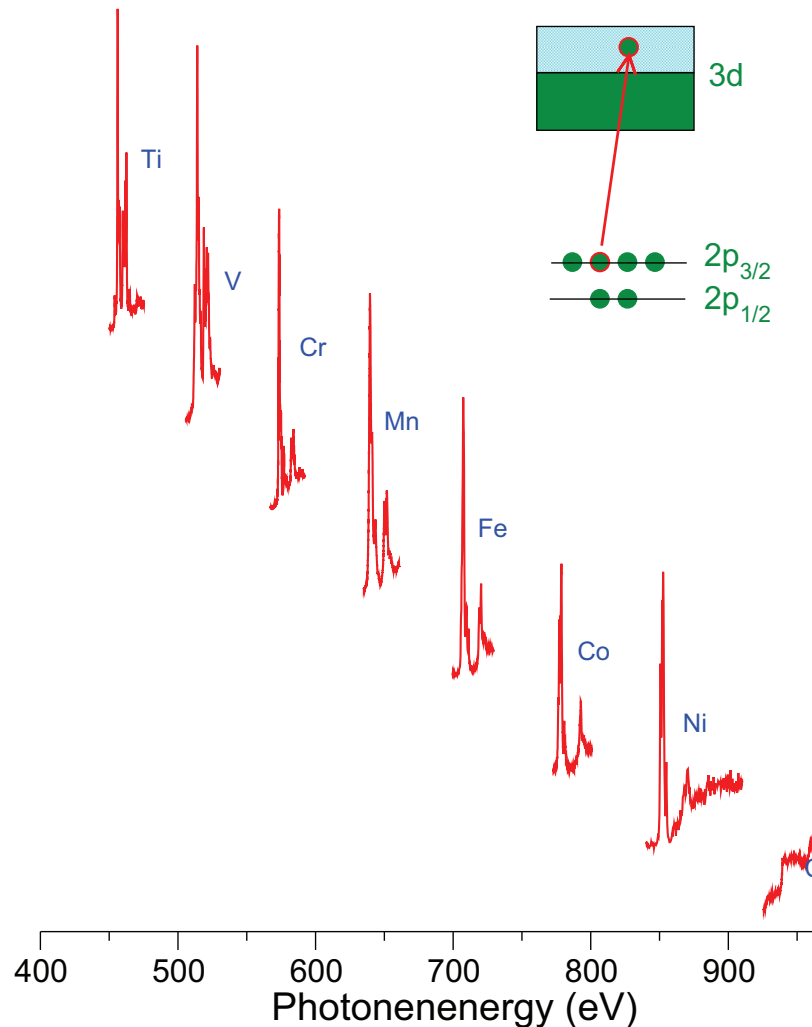
- Typische “Soft Landing” Präparation von Clustern auf Oberflächen



Magnetismus von deponierten Clustern

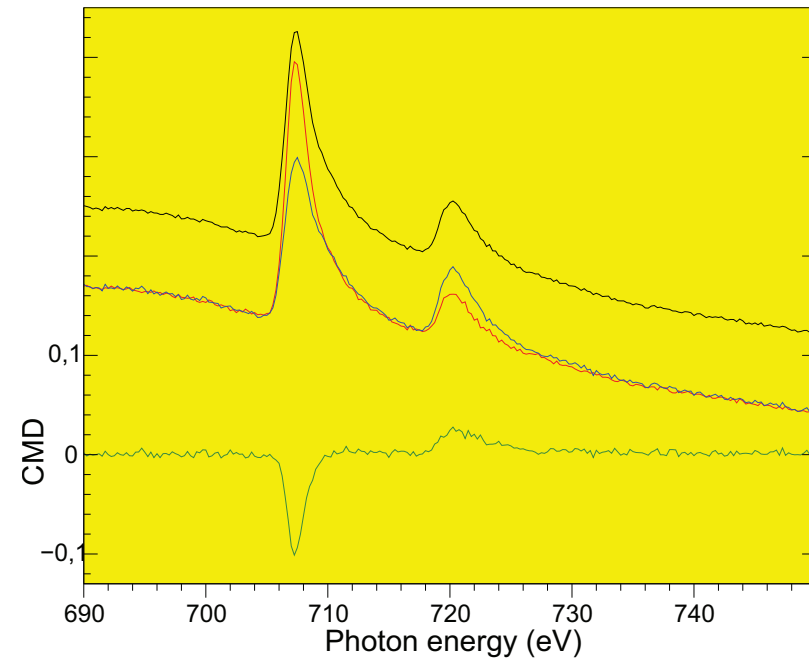
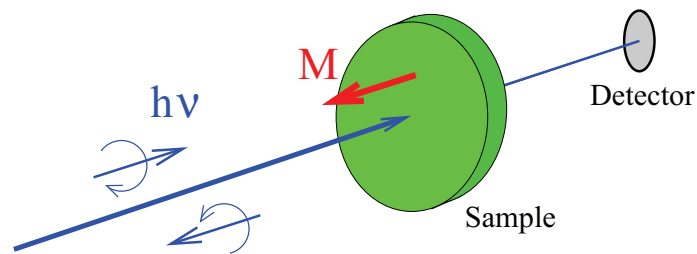
- Wie kann man die magnetischen Eigenschaften von deponierten Clustern bestimmen ?
- Es wird eine Methode benötigt, die selektiv die Eigenschaften der Cluster bestimmt
 - Stern Gerlach wie beim freien Cluster: Nein
 - Magneto-Optischer Kerr Effekt (MOKE): Sehr schwierig, da die Teilchendichte sehr klein ist: Nein
 - Röntgenzirkulardichroismus (XMCD): Ja
Methode, die Bahn- und Spinmomente getrennt bestimmen kann
Die Methode mittelt über viele Cluster
 - Spin-Polarisierte Rastertunnelspektroskopie: Ja
Methode, die die lokalen magnetischen Eigenschaften bestimmen kann
Es können keine magnetischen Momente bestimmt werden

Röntgenzirkulardichroismus (XMCD)



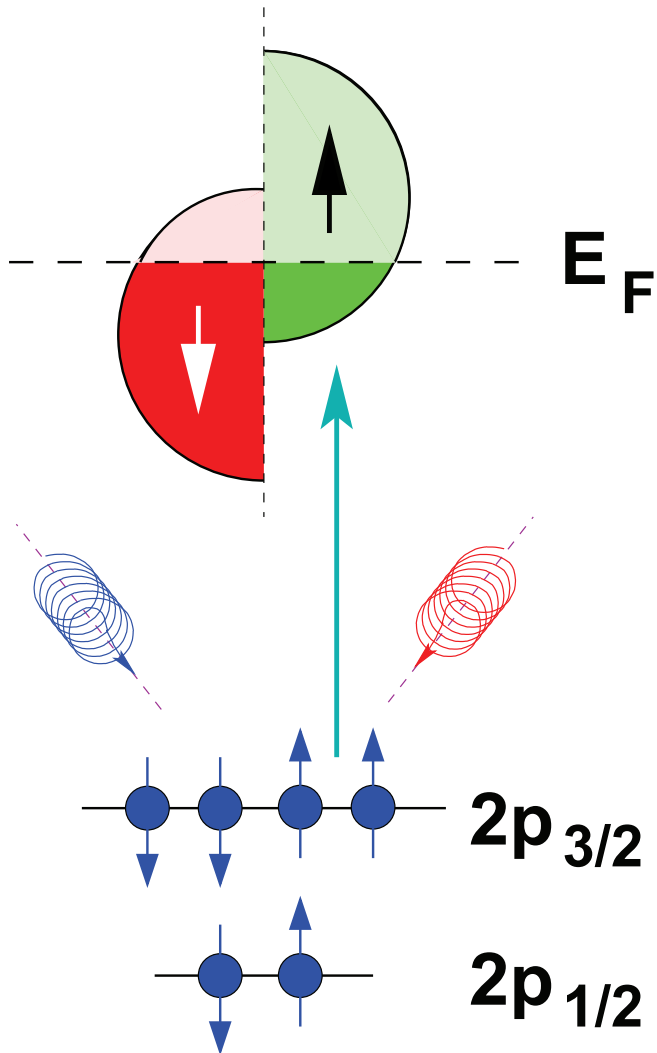
- Nutze die Elementselektivität von Rumpfniveauanregungen aus.
- Beispiel: Anregung von 2p Elektronen von Eisen (700 eV) und Nickel (850 eV)

Röntgenzirkulardichroismus (XMCD)



- Der magnetische Zirkulardichroismus nutzt die Asymmetrie bei der Anregung von Rumpfelektronen mit zirkular polarisierter Röntgenstrahlung

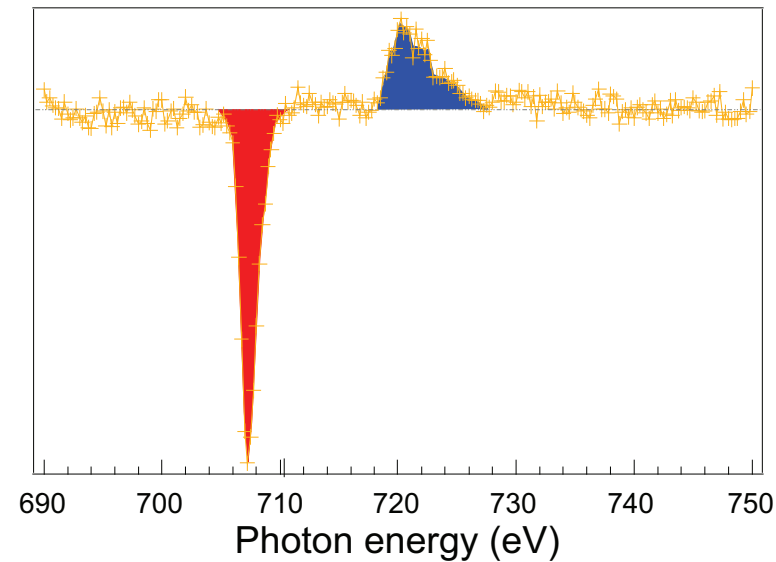
Röntgenzirkulardichroismus (XMCD)



- Einfaches Zwei-Stufen Modell

- 1 Ein zirkular polarisiertes Photon erzeugt ein Spin-polarisiertes Elektron
- 2 Das Spin-polarisierte Elektron testet die Spin-polarisierten 3d Zustände des Clusters, die für die magnetischen Eigenschaften verantwortlich sind

Röntgenzirkulardichroismus (XMCD)



- Aus den Dichroismusspektren können die magnetischen Spin- und Bahnmomente μ_S und μ_B mit Hilfe von sogenannten Summenregeln ermittelt werden

$$\mu_{\text{Bahn}} \propto \int (\Delta\mu_{L3} + \Delta\mu_{L2}) dE$$

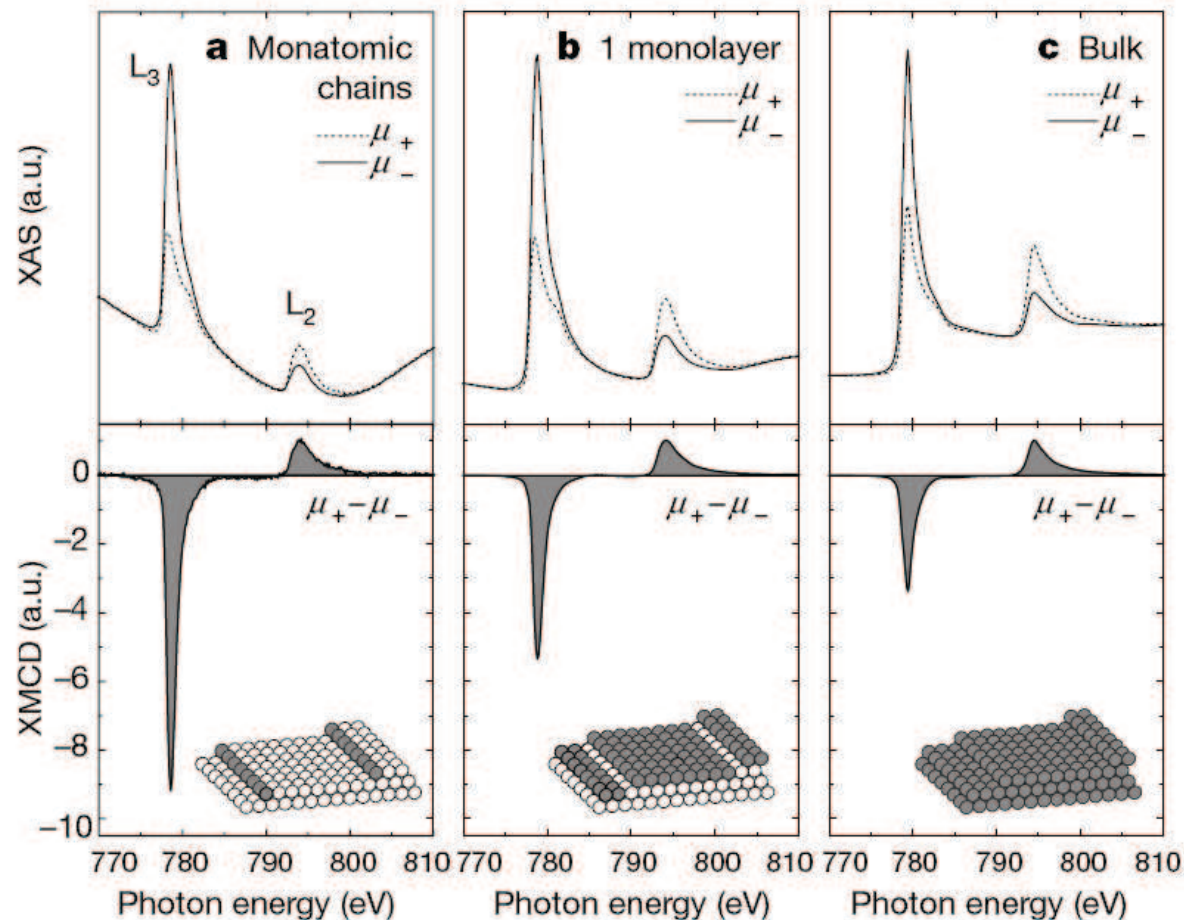
$$\mu_{\text{Spin}} \propto \int (\Delta\mu_{L3} - 2 \cdot \Delta\mu_{L2}) dE + 7 \langle T_z \rangle$$

Magnetismus von deponierten Clustern

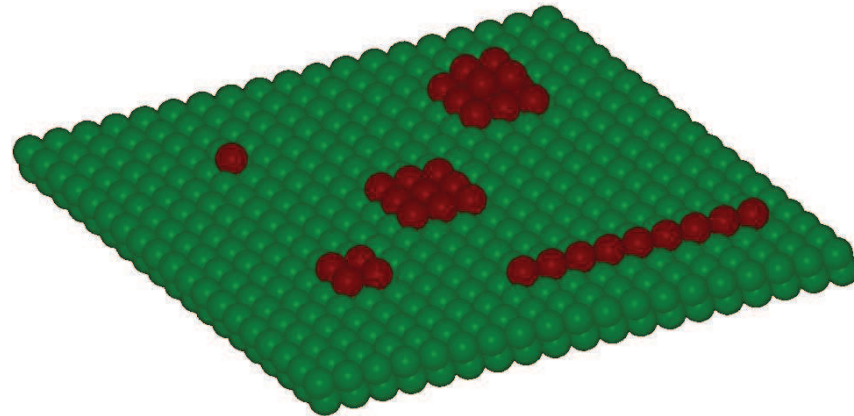
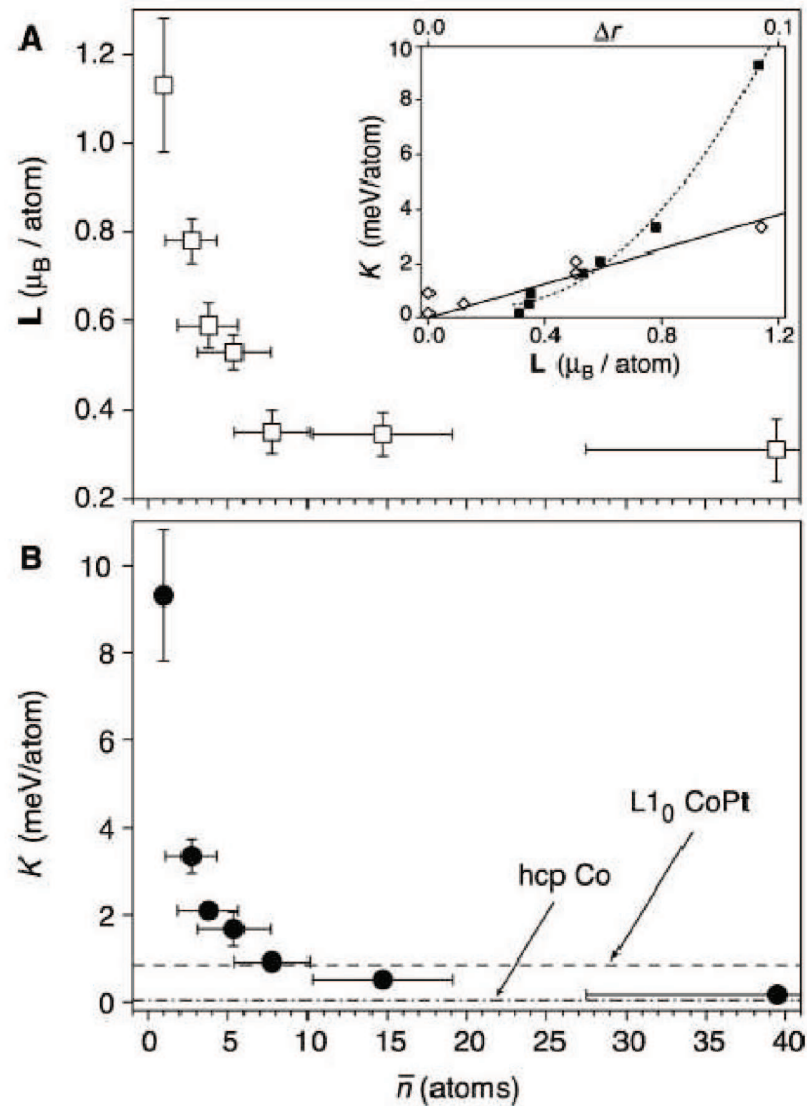
- Wie unterscheidet sich der Magnetismus von denen freier Cluster, d.h. welche Einfluß haben verschiedene Oberflächen.
- Wann sind die Cluster magnetisch ?
 - Bestimmung der Remananz der Cluster z.B. durch eine Hysteresemessung
- Sehr kleine Cluster sind typisch superparamagnetisch und müssen durch ein magnetisches Feld ausgerichtet werden
 - 1 Starkes externes Feld von einigen Tesla eines supraleitenden Magneten *oder*
 - 2 Ankopplung an eine ferromagnetische Schicht/Oberfläche, die den Cluster über eine Austauschkopplung magnetisiert

Magnetismus von deponierten Clustern

- Beispiel 1: Co_n Cluster auf einer Platinoberfläche (Gambardella et al. Nature **416**, 301 (2002); Science **300**, 1130 (2003))
- Die Cluster zeigen stark erhöhte magnetische Spin- und Bahnmomente

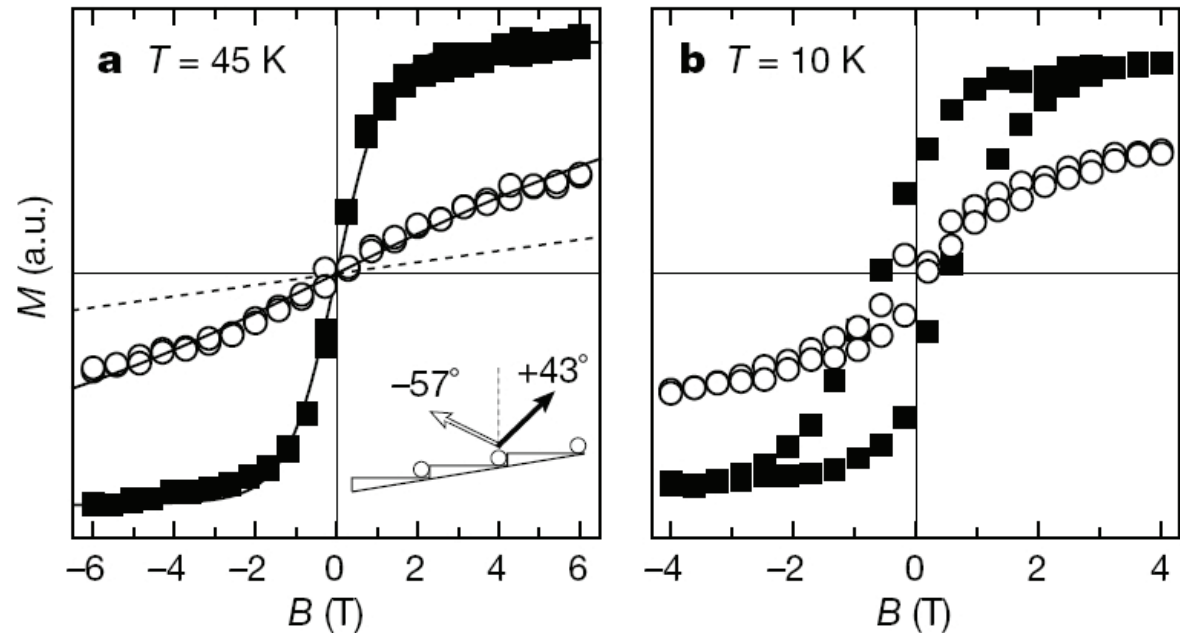
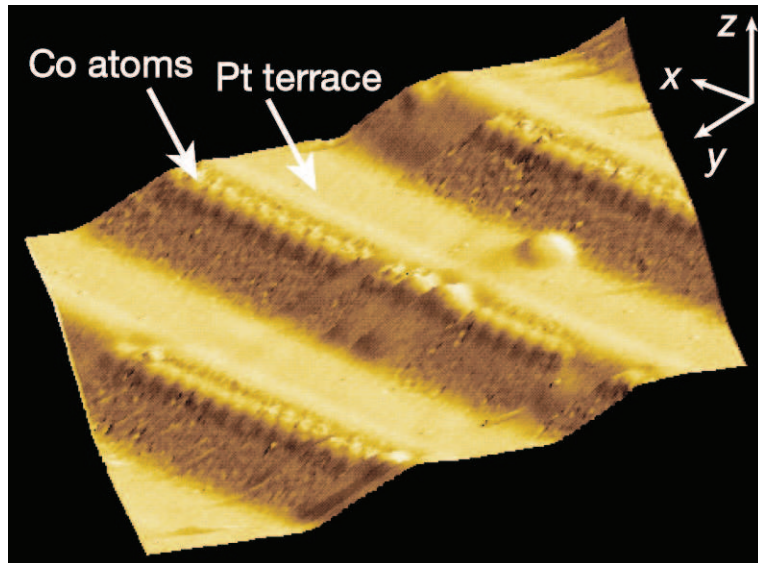


Magnetismus von deponierten Clustern



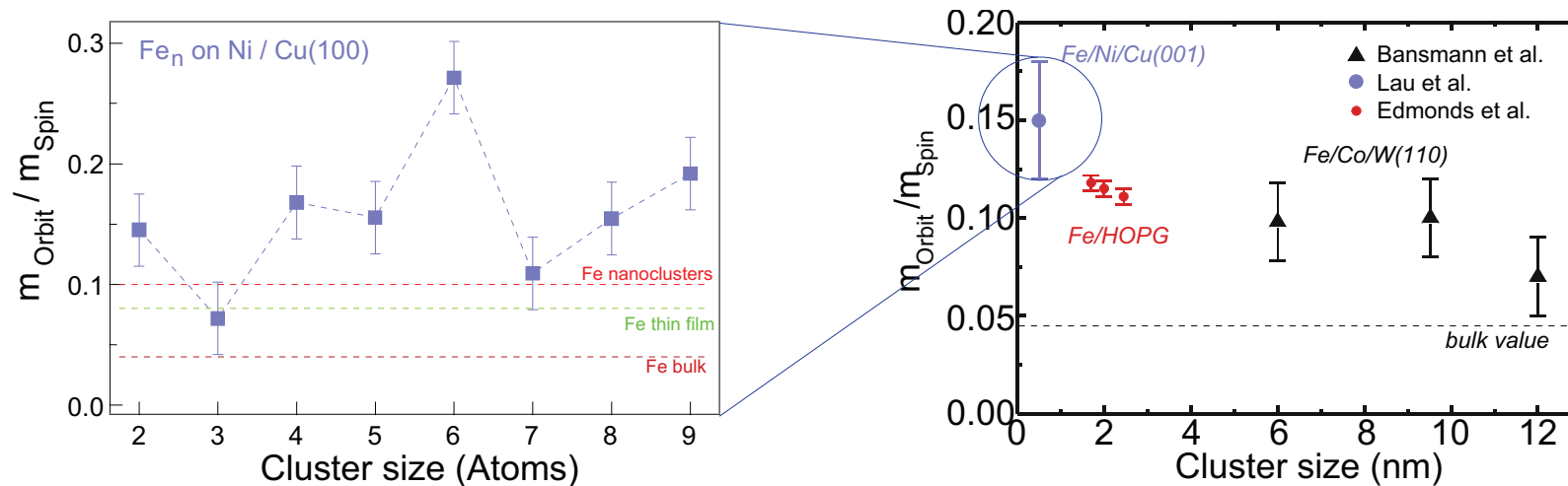
- Die magnetische Asymmetrie zeigt einen sehr ähnlichen Verlauf wie die magnetischen Bahnmomente

Magnetismus von deponierten Clustern



- Sehr starke magnetische Asymmetrie von Ketten
- Geometrie der Cluster ist von großer Bedeutung
- Ferromagnetisches Verhalten bereits weniger Atome allerdings bei $T=10$ K folgt aus der Messung der Hysterese

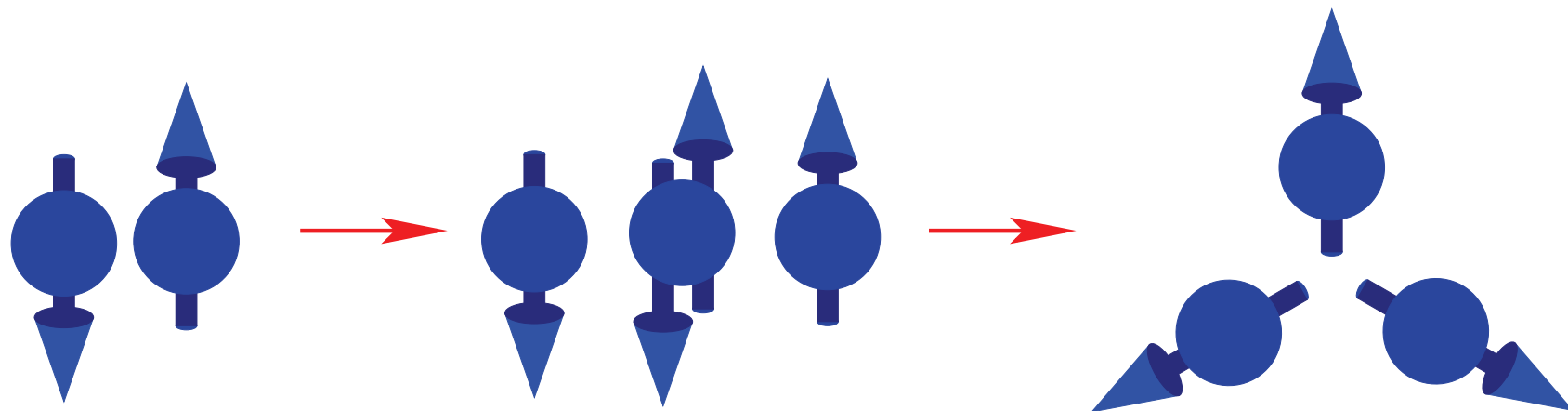
Magnetismus von deponierten Clustern



- Beispiel 2: Massenselektierte Fe_n Cluster und Fe Nanostrukturen auf magnetischen Oberflächen
- Besonders interessant sind die Bahnmomente, da diese mit der Asymmetrie beknüpft sind
- Gleichfalls stark erhöhte magnetische Momente, wobei die Bahnmomente stark mit der Clustergröße variieren
- Effekt ist noch nicht richtig verstanden

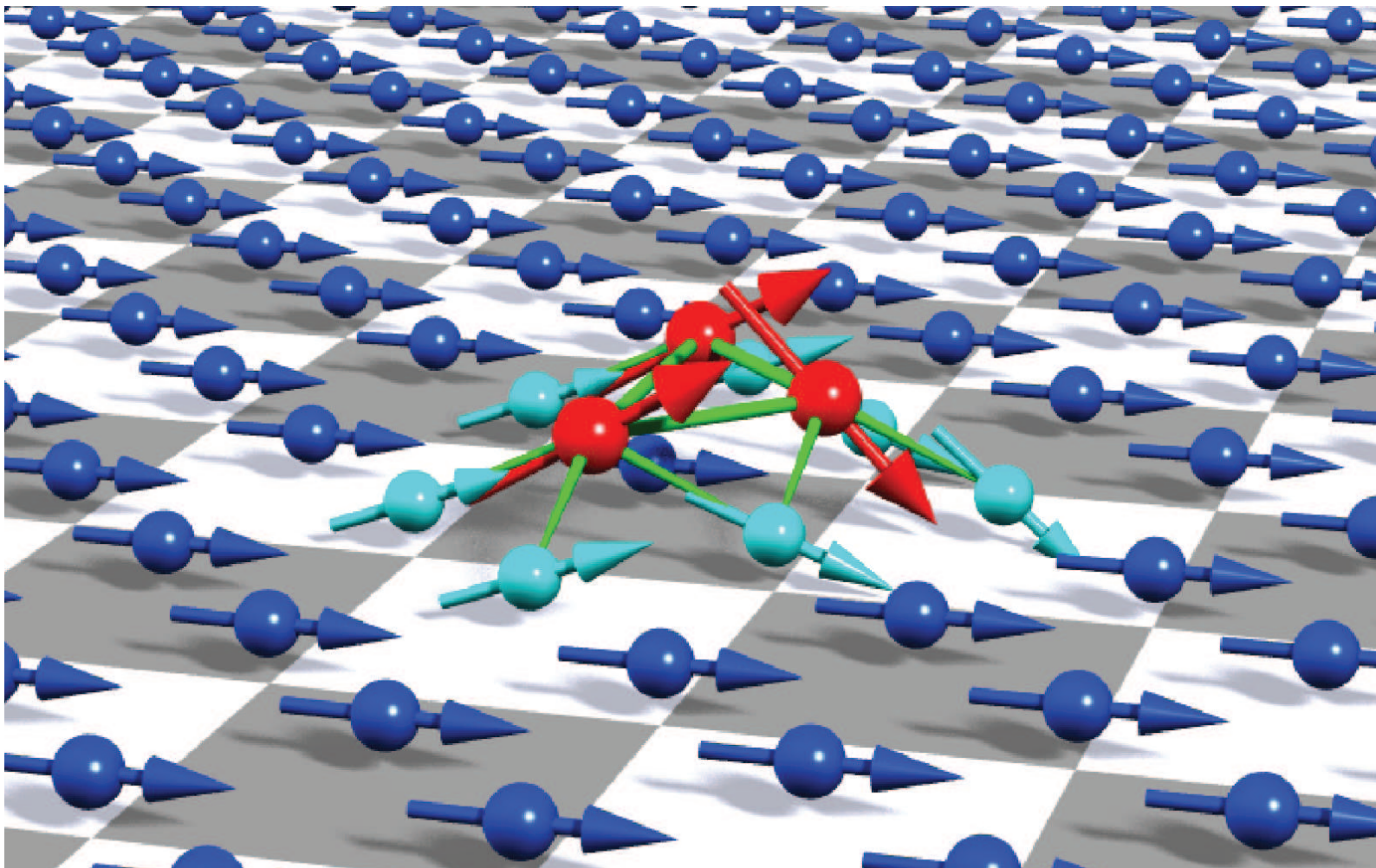
Antiferromagnetische Kopplung

- Im Fall einer ferromagnetischen Kopplung sind alle magnetischen Momente parallel ausgerichtet
- Bei einer anti-ferromagnetischen Kopplung erhält man dementsprechend eine antiparallele Kopplung der Momente
- Was ist nun für dem Fall kleiner, anti-ferromagnetisch koppelnder Cluster zu erwarten ?
- Frustrierte Spins führen zu einer nicht kollinearen Kopplung der magnetischen Momente



Antiferromagnetisch gekoppelte Cluster

- Beispiel: Cr auf Ni und Fe
- Großer Einfluß des Substrates (Unterlage). Verschwindene Magnetisierung im Fall eines Ni Substrates



Antiferromagnetische Cluster: Cr₃ auf Au

