

Exp. Bestimmung der elektronischen Zustandsdichte von Spintronik Materialien

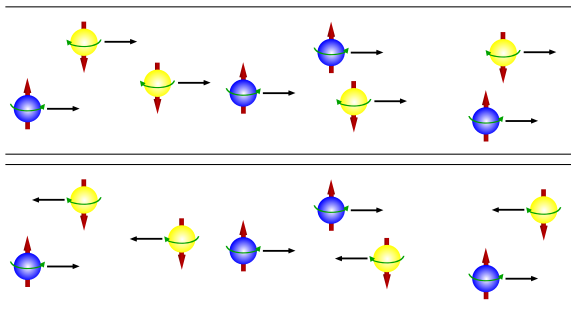
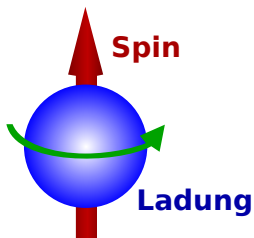
Jonas Kunze

Universität Mainz
Prof. Dr. H. J. Elmers

28. Juni 2010

Spintronik

Die Spintronik nutzt zur Informationsspeicherung und -übertragung neben der Ladung auch das magnetische Moment eines Elektrons



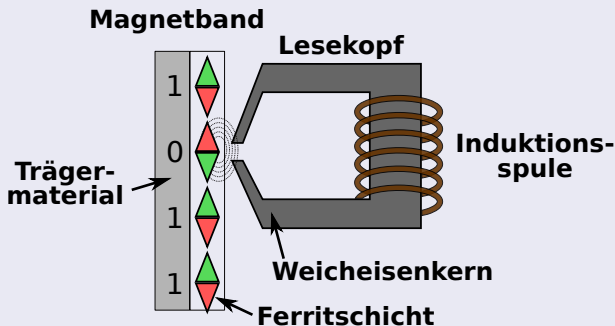
- 1 Motivation
 - Geschichte der nichtflüchtigen Datenspeicher
- 2 Ferromagnetismus
- 3 Röntgenabsorptionsspektroskopie
 - XAS
 - XMCD
 - Röntgenoptik
 - MTXM
 - STXM
- 4 Fazit

- 1 Motivation
 - Geschichte der nichtflüchtigen Datenspeicher
- 2 Ferromagnetismus
- 3 Röntgenabsorptionsspektroskopie
 - XAS
 - XMCD
 - Röntgenoptik
 - MTXM
 - STXM
- 4 Fazit

Magnetbänder

1930 bis heute

Sequentielles Lesen mit festem Lesekopf



Festplatten

1956 bis heute



Abb.: Erste Festplatte: IBM 350
[<http://ed-thelen.org/RAMAC/>]



Abb.: Moderne 750GB Platte
[<http://de.wikipedia.org/wiki/Festplattenlaufwerk>]

Festplatten

1956 bis heute

- Erste Platte ca. 5MB groß, 500kg schwer, 24" Durchmesser, 10kW Leistung, 8,8kB/s, 600ms Zugriffszeit
- Heute 2TB, 3,5" Durchmesser, unter 6ms Zugriffszeit

Flaschenhals heutiger Computer

- Schnelle Zugriffszeiten erfordern hohe Drehzahlen
- Hohe Kapazitäten erfordern kleine Speicherbezirke (Induktion nur bis 1994)

Festplatten

1956 bis heute

- Erste Platte ca. 5MB groß, 500kg schwer, 24" Durchmesser, 10kW Leistung, 8,8kB/s, 600ms Zugriffszeit
- Heute 2TB, 3,5" Durchmesser, unter 6ms Zugriffszeit

Flaschenhals heutiger Computer

- Schnelle Zugriffszeiten erfordern hohe Drehzahlen
- Hohe Kapazitäten erfordern kleine Speicherbezirke (Induktion nur bis 1994)

- 1 Motivation
 - Geschichte der nichtflüchtigen Datenspeicher
- 2 Ferromagnetismus
- 3 Röntgenabsorptionsspektroskopie
 - XAS
 - XMCD
 - Röntgenoptik
 - MTXM
 - STXM
- 4 Fazit

Ferromagnetismus

Kollektives Phänomen

Mehrheitlich parallele Ausrichtung der Elektronenspins

Parallelstellung zunächst ungünstig, da nach Pauli höhere Energieniveaus besetzt werden müssen

Austauschwechselwirkung verringert potentielle Energie

Bei wenigen Festkörpern ist parallele Ausrichtung energetisch günstiger

Ferromagnetismus

Kollektives Phänomen

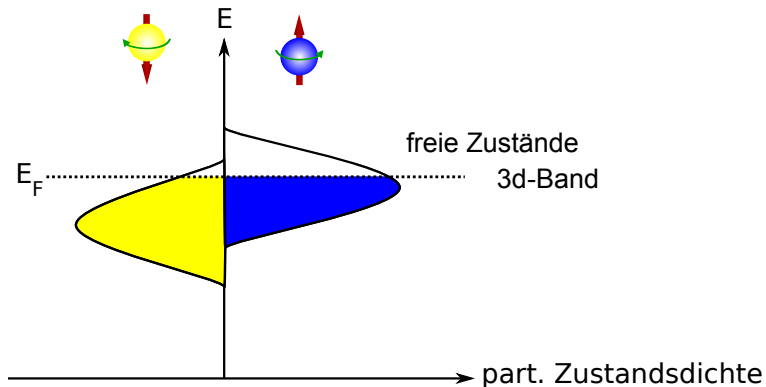
Mehrheitlich parallele Ausrichtung der Elektronenspins

Parallelstellung zunächst ungünstig, da nach Pauli höhere Energieniveaus besetzt werden müssen

Austauschwechselwirkung verringert potentielle Energie

Bei wenigen Festkörpern ist parallele Ausrichtung energetisch günstiger

Zustandsdichte von Ferromagneten



- 1 Motivation
 - Geschichte der nichtflüchtigen Datenspeicher
- 2 Ferromagnetismus
- 3 Röntgenabsorptionsspektroskopie
 - XAS
 - XMCD
 - Röntgenoptik
 - MTXM
 - STXM
- 4 Fazit

Röntgenabsorptionsspektroskopie XAS

Weiche Röntgenstrahlung zwischen 50eV und 2000eV

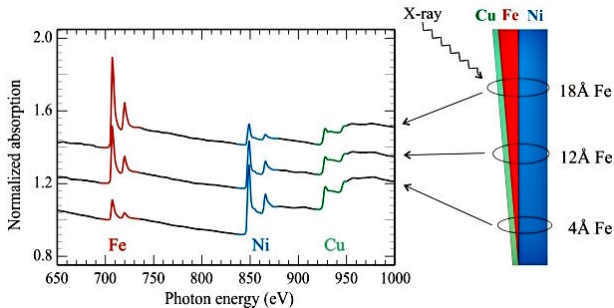


Abb.: Absorptionsspektrum einer Cu-Fe-Ni Probe [Stan]

Röntgenabsorptionsspektroskopie XAS

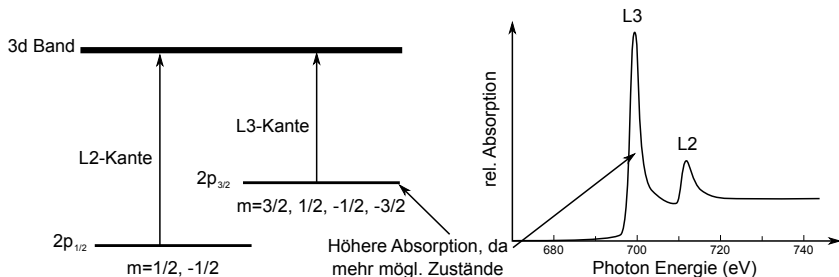


Abb.: Termschema und Absorptionsspektrum von Eisen

X-ray Magnetic Circular Dichroism

Dichroismus

Abhängigkeit der Lichtabsorption von der Polarisation der einstrahlenden elmag. Welle (hier links- oder rechtszirkular)

Zirkular polarisiertes Licht hat einen Bahndrehimpuls!

Bahndrehimpuls wird an Elektron übertragen (Dipolübergang):

$$\Delta l = \pm 1$$

$$\Delta j = 0, \pm 1$$

$$\Delta m_l = m_\gamma$$

$$\Delta m_j = m_\gamma$$

$$\Delta m_s = 0$$

X-ray Magnetic Circular Dichroism

Dichroismus

Abhängigkeit der Lichtabsorption von der Polarisation der einstrahlenden elmag. Welle (hier links- oder rechtszirkular)

Zirkular polarisiertes Licht hat einen Bahndrehimpuls!

Bahndrehimpuls wird an Elektron übertragen (Dipolübergang):

$$\Delta l = \pm 1$$

$$\Delta j = 0, \pm 1$$

$$\Delta m_l = m_\gamma$$

$$\Delta m_j = m_\gamma$$

$$\Delta m_s = 0$$

X-ray Magnetic Circular Dichroism

$$\begin{array}{ccccccc}
 & & 3d_{3/2} & & & 3d_{5/2} & \\
 3d \text{ Band } m_j & \underline{-3/2} & \underline{-1/2} & \underline{1/2} & \underline{3/2} & \underline{-5/2} & \underline{-3/2} & \underline{-1/2} & \underline{1/2} & \underline{3/2} & \underline{5/2} & m_j
 \end{array}$$

$$\begin{array}{ccccccc}
 & & & & \overline{-3/2} & \overline{-1/2} & \overline{1/2} & \overline{3/2} & m_j \\
 m_j & \overline{-1/2} & & \overline{1/2} & & & & & \\
 & 2p_{1/2} & & & & 2p_{3/2} & & &
 \end{array}$$

X-ray Magnetic Circular Dichroism

$$\begin{array}{ccccccc}
 & & 3d_{3/2} & & & 3d_{5/2} & \\
 3d \text{ Band } m_j & -3/2 & -1/2 & 1/2 & 3/2 & -5/2 & -3/2 & -1/2 & 1/2 & 3/2 & 5/2 & m_j
 \end{array}$$

links polarisierte
Röntgenstrahlung

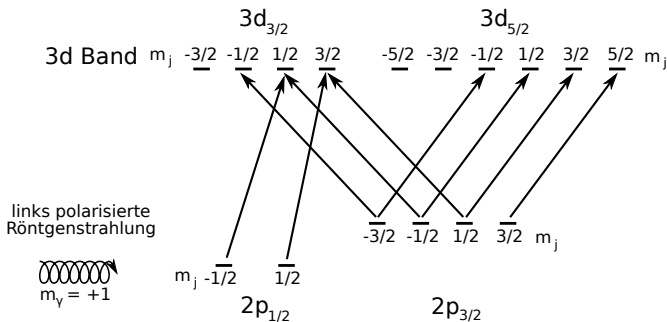


$$\begin{array}{cc}
 m_j & -1/2 & 1/2 \\
 2p_{1/2} & &
 \end{array}$$

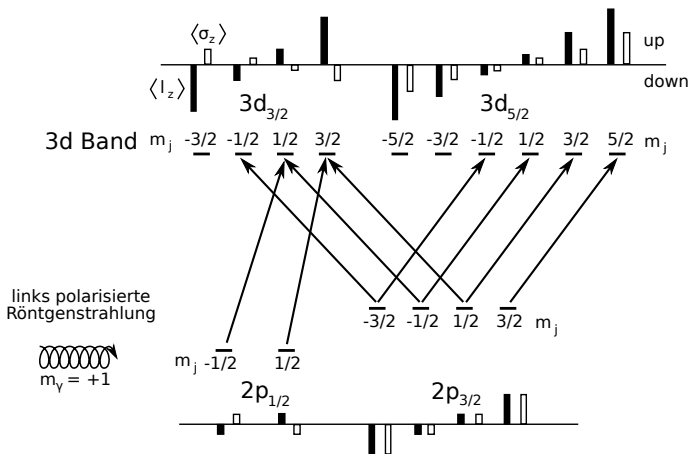
$$\begin{array}{ccccc}
 -3/2 & -1/2 & 1/2 & 3/2 & m_j
 \end{array}$$

$$2p_{3/2}$$

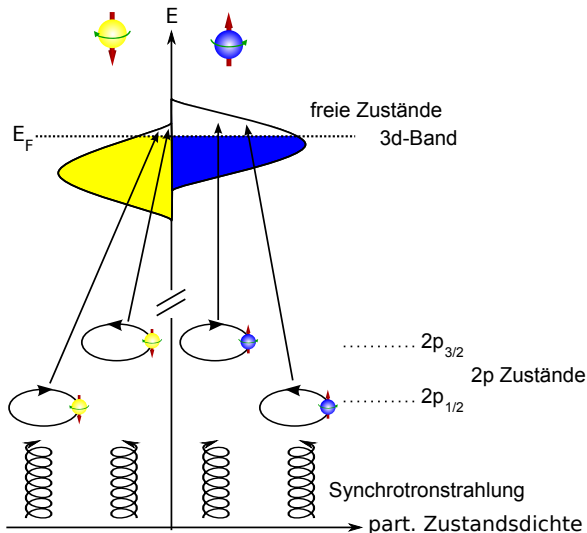
X-ray Magnetic Circular Dichroism



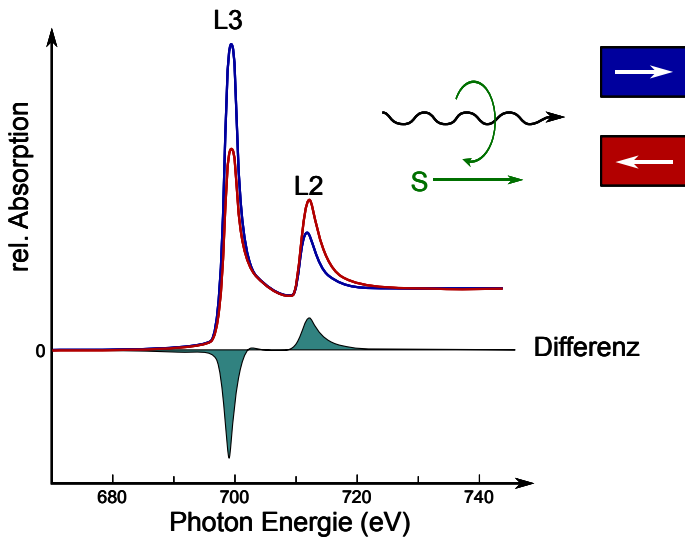
X-ray Magnetic Circular Dichroism



X-ray Magnetic Circular Dichroism



XMCD



Hoher Anspruch an die Röntgenstrahlung

Elementselektive Mikroskopie

- Durchstimmbare Photonenenergie (Bereich ca. 50eV bis 2000eV)
- Extrem hohe Intensität nötig

Hoher Anspruch an die Röntgenstrahlung

Elementselektive Mikroskopie

- Durchstimmbare Photonenenergie (Bereich ca. 50eV bis 2000eV)
- Extrem hohe Intensität nötig

Synchrotronstrahlung!

Es gibt z.Zt. 44
Synchrotronlaboratorien
Weltweit, 5 in Deutschland

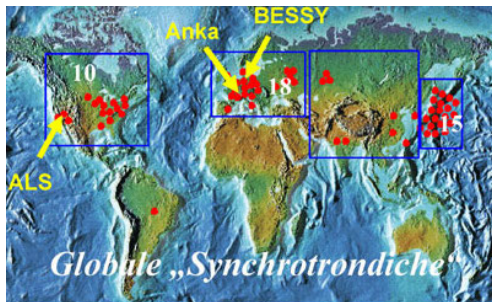
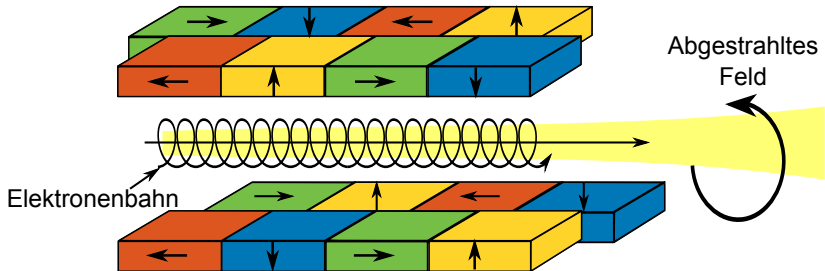


Abb.: Globale Synchrotrondichte [Schu]

Zirkular Polarisierte Röntgenstrahlung

Helikale Undulatoren im Synchrotron

Erreichte Intensität ca. 10^8 mal größer als Röntgenröhren



Röntgen-Linsen

Fresnel-Zonenplättchen

Konzentrische, nach außen bis auf 20 nm dünner werdende Zylinder

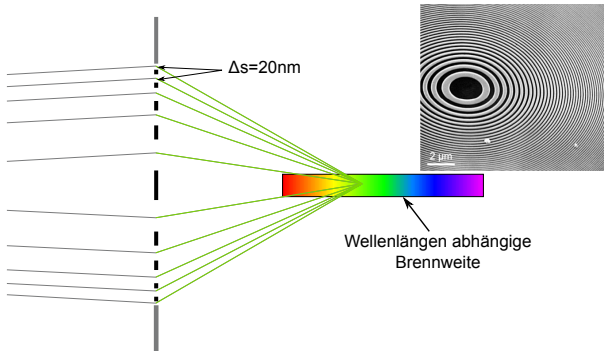
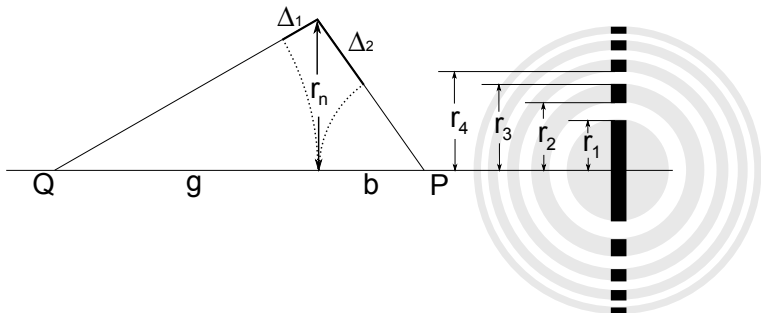


Abb.: Querschnitt eines Zonenplättchens Foto: [Eim]

Fresnel-Zonenplättchen



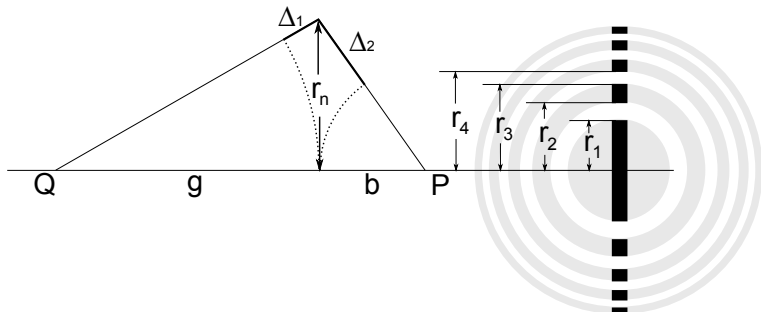
$$\Delta_1 = \sqrt{g^2 + r_n^2} - g$$

$$\Delta_2 = \sqrt{b^2 + r_n^2} - b$$

Konstruktive Interferenz

$$\Delta_{total} = \Delta_1 + \Delta_2 = \frac{n\lambda}{2}$$

Fresnel-Zonenplättchen



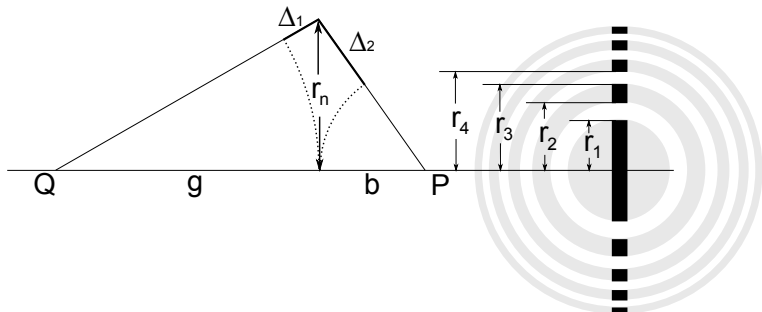
$$\Delta_1 = \sqrt{g^2 + r_n^2} - g$$

$$\Delta_2 = \sqrt{b^2 + r_n^2} - b$$

Konstruktive Interferenz

$$\Delta_{total} = \Delta_1 + \Delta_2 = \frac{n\lambda}{2}$$

Fresnel-Zonenplättchen



$$\Delta_1 = \sqrt{g^2 + r_n^2} - g$$

$$\Delta_2 = \sqrt{b^2 + r_n^2} - b$$

Konstruktive Interferenz

$$\Delta_{total} = \Delta_1 + \Delta_2 = \frac{n\lambda}{2}$$

Fresnel-Zonenplättchen

$$\Delta_{total} = \Delta_1 + \Delta_2 = \frac{n\lambda}{2}$$

$$\Rightarrow \sqrt{g^2 + r_n^2} - g + \sqrt{b^2 + r_n^2} - b = \frac{n\lambda}{2}$$

$$\Rightarrow r_n^2 = \frac{\frac{n^4\lambda^4}{16} + \frac{n^3\lambda^3(g+b)}{2} + n^2\lambda^2(gb + (g+b)^2) + 4n\lambda gb(g+b)}{4(g+b)(n\lambda + (g+b)) + n^2\lambda^2}$$

$$\lambda \ll g, b$$

$$r_n^2 \approx n\lambda \frac{gb}{g+b} = n\lambda f$$

mit $\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$

Ringbreite

$$dr_n = \frac{\partial r_n}{\partial n} = \frac{r_n}{n}$$

Fresnel-Zonenplättchen

$$\Delta_{total} = \Delta_1 + \Delta_2 = \frac{n\lambda}{2}$$

$$\Rightarrow \sqrt{g^2 + r_n^2} - g + \sqrt{b^2 + r_n^2} - b = \frac{n\lambda}{2}$$

$$\Rightarrow r_n^2 = \frac{\frac{n^4\lambda^4}{16} + \frac{n^3\lambda^3(g+b)}{2} + n^2\lambda^2(gb + (g+b)^2) + 4n\lambda gb(g+b)}{4(g+b)(n\lambda + (g+b)) + n^2\lambda^2}$$

$$\lambda \ll g, b$$

$$r_n^2 \approx n\lambda \frac{gb}{g+b} = n\lambda f$$

$$\text{mit } \frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$$

Ringbreite

$$dr_n = \frac{\partial r_n}{\partial n} = \frac{r_n}{n}$$

Fresnel-Zonenplättchen

$$\Delta_{total} = \Delta_1 + \Delta_2 = \frac{n\lambda}{2}$$

$$\Rightarrow \sqrt{g^2 + r_n^2} - g + \sqrt{b^2 + r_n^2} - b = \frac{n\lambda}{2}$$

$$\Rightarrow r_n^2 = \frac{\frac{n^4\lambda^4}{16} + \frac{n^3\lambda^3(g+b)}{2} + n^2\lambda^2(gb + (g+b)^2) + 4n\lambda gb(g+b)}{4(g+b)(n\lambda + (g+b)) + n^2\lambda^2}$$

$$\lambda \ll g, b$$

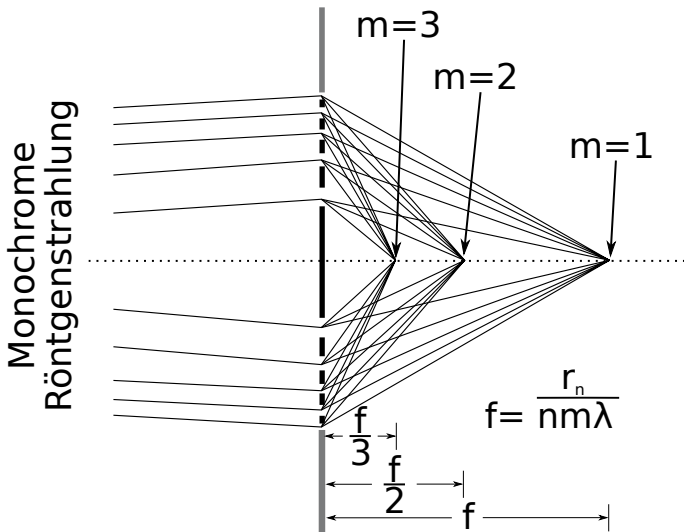
$$r_n^2 \approx n\lambda \frac{gb}{g+b} = n\lambda f$$

mit $\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$

Ringbreite

$$dr_n = \frac{\partial r_n}{\partial n} = \frac{r_n}{n}$$

Fresnel-Zonenplättchen



Fresnel-Zonenplättchen

Ortsauflösung

Rayleigh-Kriterium: maximale Ortsauflösung



Für eine monochromatische Einstrahlung gilt:

$$\delta = 1,22 \frac{dr_N}{m}$$

Fresnel-Zonenplättchen

Ortsauflösung

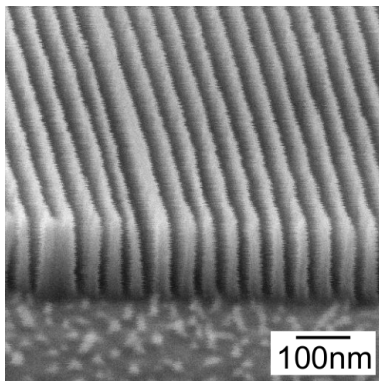
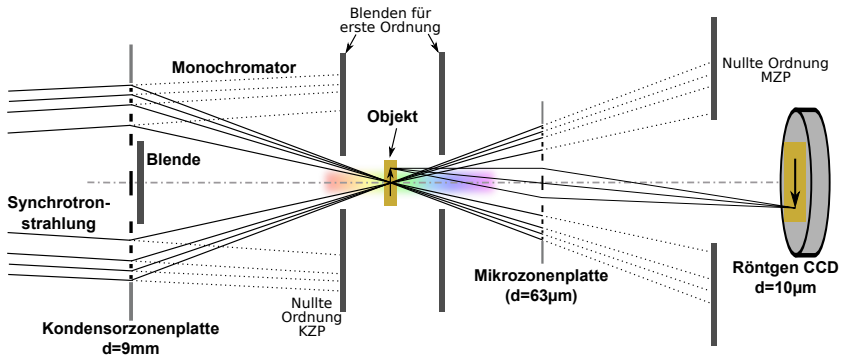


Abb.: Ni Zonenplättchen Uni Göttingen 2000 ($dr_N = 22\text{nm}$) [Eim]

Magnetische Röntgentransmissionsmikroskopie

MTXM



Magnetische Röntgentransmissionsmikroskopie MTXM

Erste Bilder am Bessy I 1996:

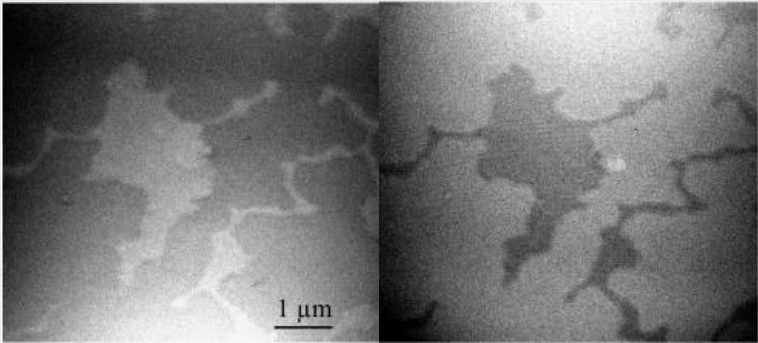


Abb.: Erste MTXM Aufnahmen von $Fe_{72}Gd_{28}$ (links und rechts-polarisierte Einstrahlung) [Fis]

Magnetische Röntgentransmissionsmikroskopie

MTXM

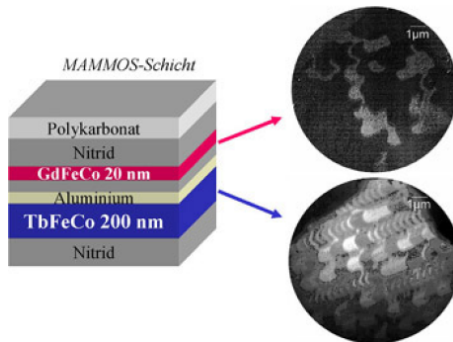
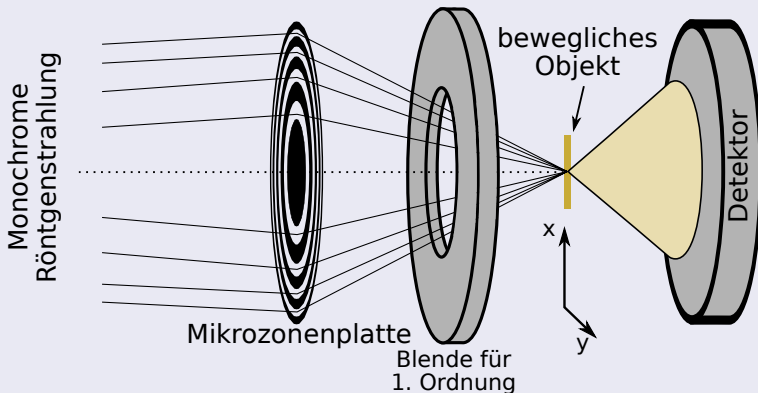


Abb.: **M**agnetic **A**mplifying **M**agneto-**O**ptical System [Schu]

Rasterndes Verfahren

STXM

Scanning Transmission X-ray Microscope



STXM

Vortice

Advanced Light Source in
Berkeley

2 Elektronen-bunches: 70ps breit,
328ns Abstand

MPI Stuttgart 2004

400ps Strompuls in
20ps-Schritten vor Röntgenpuls

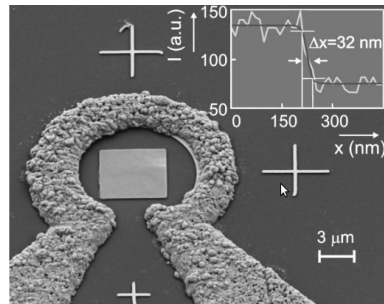


Abb.: Mikrospeule um eine $16 \mu\text{m}^2$
ferromagn. Schicht auf $100 \text{ nm } \text{Si}_3\text{N}_4$
Membran [Stoll]

STXM

Vortice

Advanced Light Source in
Berkeley

2 Elektronen-bunches: 70ps breit,
328ns Abstand

MPI Stuttgart 2004

400ps Strompuls in
20ps-Schritten vor Röntgenpuls

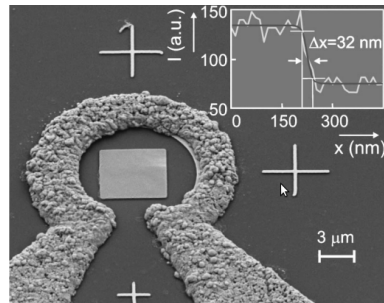


Abb.: Mikrospule um eine $16\mu\text{m}^2$
ferromagn. Schicht auf 100nm Si_3N_4
Membran [Stoll]

STXM

Vortice

Advanced Light Source in
Berkeley

2 Elektronen-bunches: 70ps breit,
328ns Abstand

MPI Stuttgart 2004

400ps Strompuls in
20ps-Schritten vor Röntgenpuls

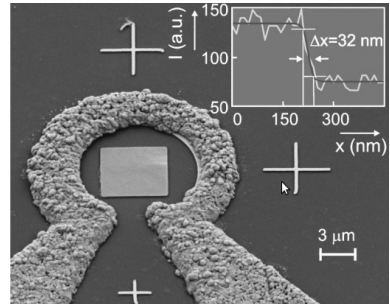


Abb.: Mikrospule um eine $16\mu\text{m}^2$
ferromagn. Schicht auf 100nm Si_3N_4
Membran [Stoll]

STXM

Vortice

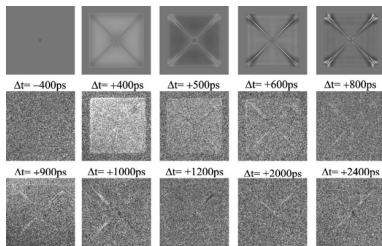


Abb.: Simulierte (erste Reihe) und gemessene Magnetisierung [Stoll]

Videos (H. Stoll): <http://www.nature.com/nature/journal/v444/n7118/supinfo/nature05240.html>

STXM

Vortice

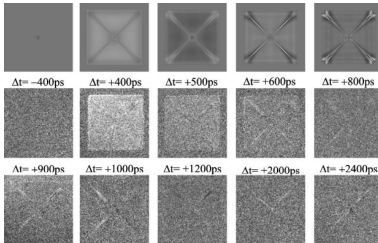


Abb.: Simulierte (erste Reihe) und gemessene Magnetisierung [Stoll]

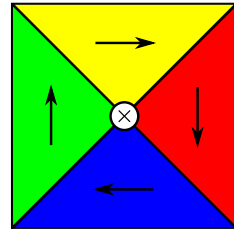


Abb.: Vortice als neues Speichermedium?

Videos (H. Stoll): <http://www.nature.com/nature/journal/v444/n7118/supinfo/nature05240.html>

STXM

Vortice

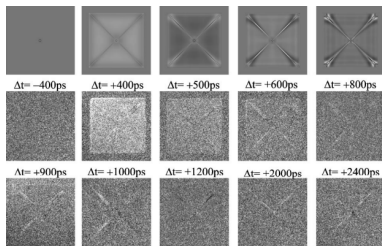


Abb.: Simulierte (erste Reihe) und gemessene Magnetisierung [Stoll]

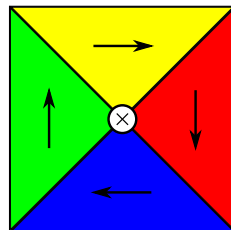


Abb.: Vortice als neues Speichermedium?

Videos (H. Stoll): <http://www.nature.com/nature/journal/v444/n7118/supinfo/nature05240.html>

Zusammenfassung

Magnetische Transmissionsröntgenmikroskopie

- + Hohe laterale Auflösung: 20nm bereits erreicht
- + Elementselektivität
- + Hohe zeitliche Auflösung (reversible Prozesse)
- Hoher Anspruch an die Probe
- Synchrotronstrahlung benötigt
- Nicht für senkrecht zum Strahl magnetisierte Proben geeignet

- 1 Motivation
 - Geschichte der nichtflüchtigen Datenspeicher
- 2 Ferromagnetismus
- 3 Röntgenabsorptionsspektroskopie
 - XAS
 - XMCD
 - Röntgenoptik
 - MTXM
 - STXM
- 4 Fazit

Ferromagnetismus

Nach 3000 Jahren noch immer ein spannendes Thema

Steigender Speicherbedarf motiviert Forschung

- Nachfolger der Festplatte noch immer unklar

Optik mit (polarisierten) Röntgenstrahlen

- Hohe Intensitäten mit Synchrotronstrahlung erreichbar
- Hohe optische Auflösung (20nm) mit Fresnel-Zonenplättchen

Messungen des Zirkulardichroismus

- Magnetische Bezirke mit 20nm Auflösung messbar
- Erfolgreiche Experimente relativieren den Aufwand

Ferromagnetismus

Nach 3000 Jahren noch immer ein spannendes Thema

Steigender Speicherbedarf motiviert Forschung

- Nachfolger der Festplatte noch immer unklar

Optik mit (polarisierten) Röntgenstrahlen

- Hohe Intensitäten mit Synchrotronstrahlung erreichbar
- Hohe optische Auflösung (20nm) mit Fresnel-Zonenplättchen

Messungen des Zirkulardichroismus

- Magnetische Bezirke mit 20nm Auflösung messbar
- Erfolgreiche Experimente relativieren den Aufwand

Ferromagnetismus

Nach 3000 Jahren noch immer ein spannendes Thema

Steigender Speicherbedarf motiviert Forschung

- Nachfolger der Festplatte noch immer unklar

Optik mit (polarisierten) Röntgenstrahlen

- Hohe Intensitäten mit Synchrotronstrahlung erreichbar
- Hohe optische Auflösung (20nm) mit Fresnel-Zonenplättchen

Messungen des Zirkulardichroismus

- Magnetische Bezirke mit 20nm Auflösung messbar
- Erfolgreiche Experimente relativieren den Aufwand

Fragen?

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!



[Eim] Thomas Eimüller

Magnetic imaging of nanostructured systems with
Transmission X-ray Microscopy (Dissertation)
2002



[Fis] P. Fischer, T. Eimüller, G. Schütz, P. Guttman, G. Schmah, K. Pruegl, G. Bayreuther
Imaging of magnetic domains by transmission X-ray microscopy
1998



[Kerr] <http://www.wmtech.de/html/ausstattung/pdf/KerrMikroskop.PDF>



[Mcm] <http://unicorn.mcmaster.ca/highlights/capers/capers.html>



[Sci] <http://www.spmlab.science.ru.nl/eng/uitleg/varianten/mfm/>



[Schu] G. Schütz

Magnetische Röntgentransmissionsmikroskopie (Tätigkeitsbericht des MPI-MF)
2003



[Stan] <http://ssrl.slac.stanford.edu/stohr/xmcd.htm>



[Stoll] H. Stoll, A. Puzic, B. van Waeyenberge, P. Fischer

High-resolution imaging of fast magnetization dynamics in magnetic nanostructures
2004