



Anregungen in Multiferroika

Autor: Sebastian Salm
Betreuer: Prof. Dr. Braden, Daniel Senff





Inhalt

1. Anregungen in Ferroelektrika und Ferromagneten
 - Phononen
 - Magnons
2. Messmethoden
 - Optische Spektroskopie
 - Neutronenstreuung
3. Anregungen in multiferroischen Materialien
 - TbMnO₃
 - Messungen





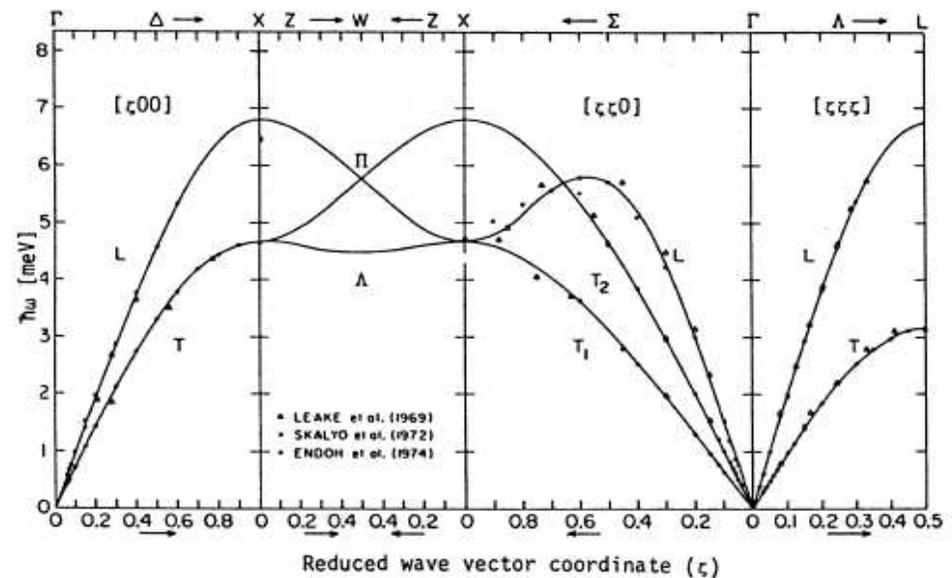
Phononen

Phononen = Schwingungen des Gitters

Longitudinale oder Transversale Schwingungen

Quasiteilchen (Bosonen) mit der Energie $\hbar\omega$ und dem Impuls $\hbar q$

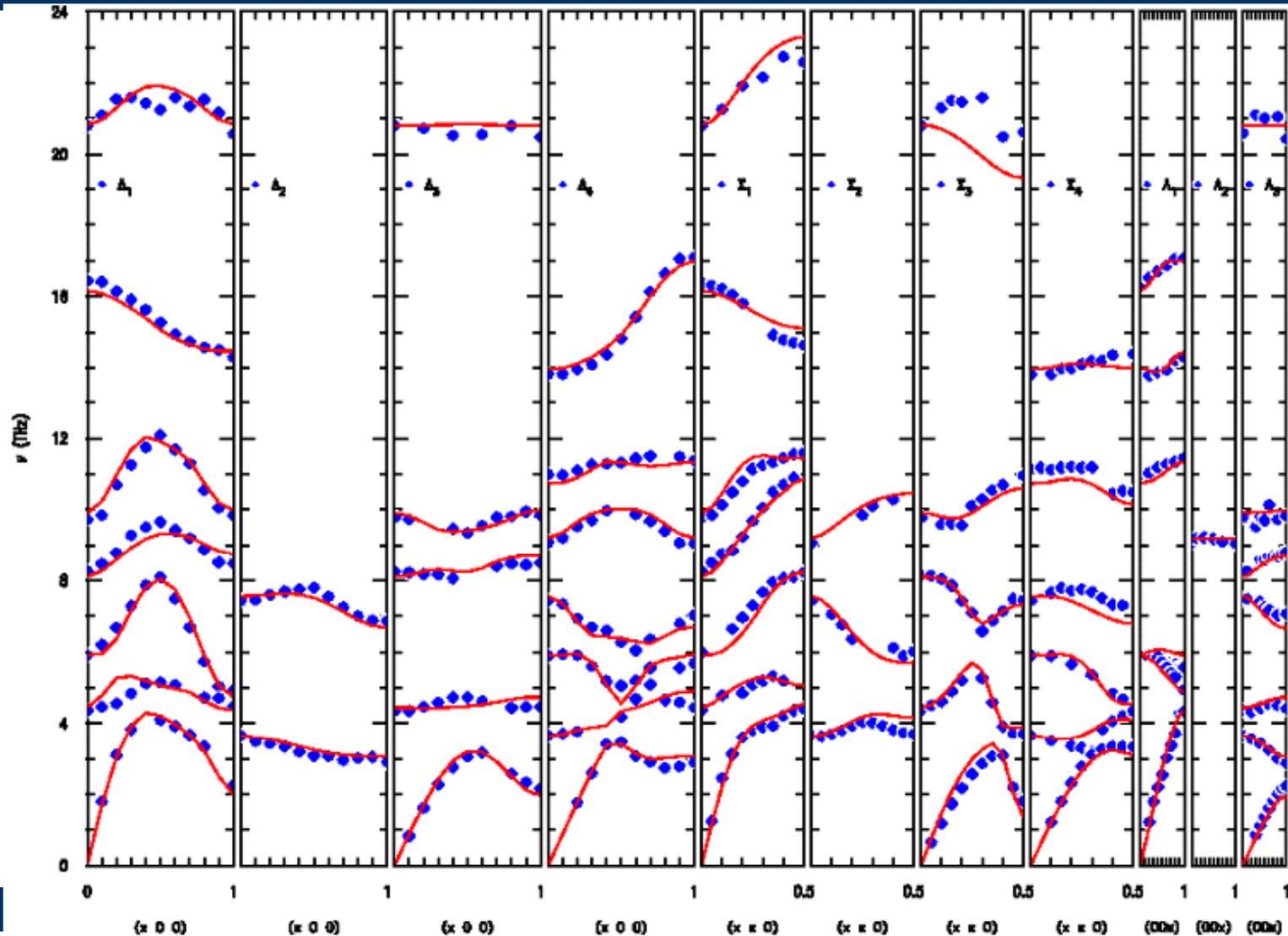
Optische und Akkustische Phononen



Neon



Phononen

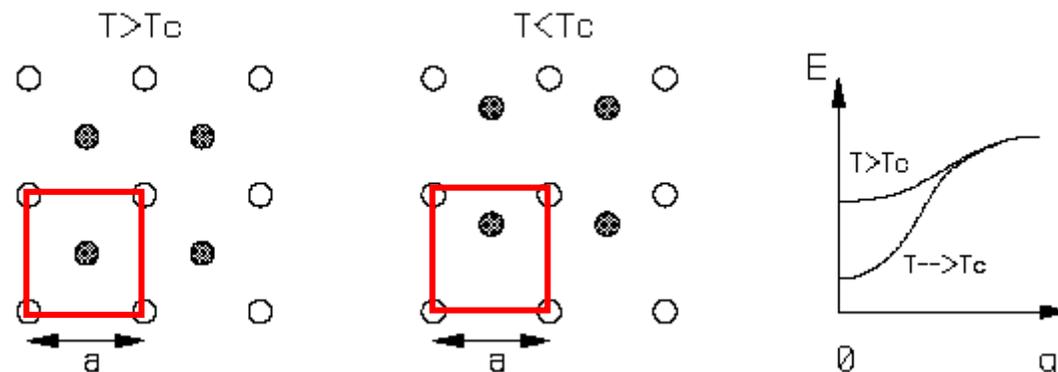




Soft Phonon Konzept

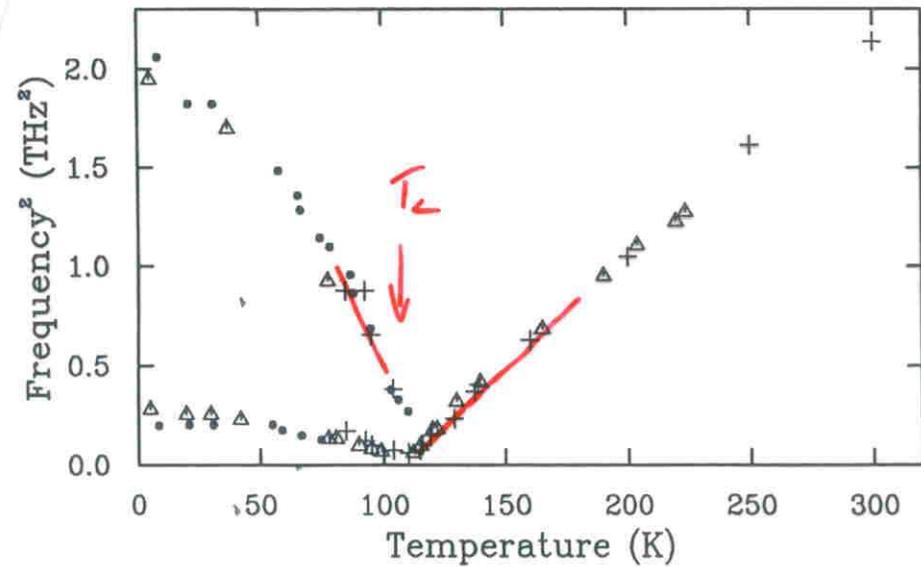
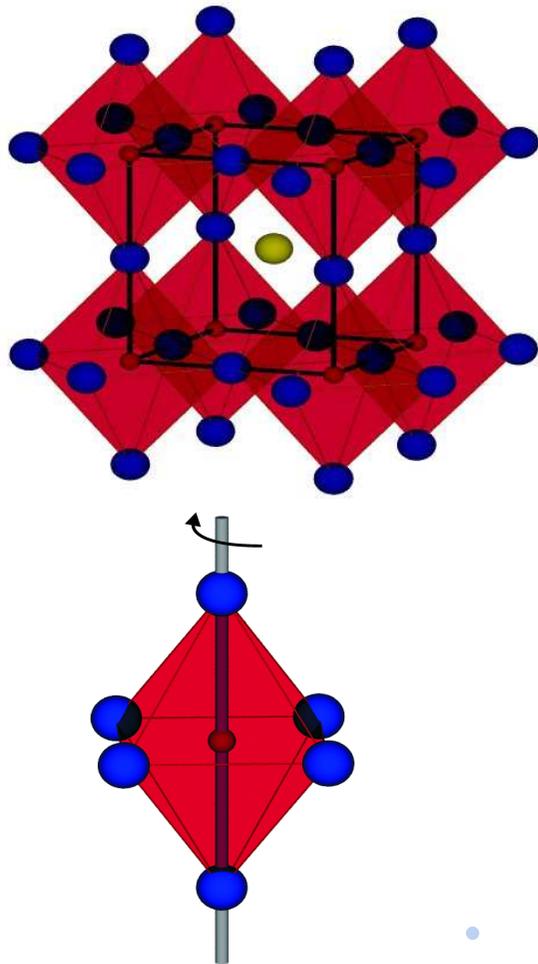
Soft Phonon: in der Phase über T_c existiert ein instabiles Phonon, dessen Frequenz, mit T gegen T_c , sehr klein wird (weichwerden).

Polarization des Phonons entspricht der strukturellen Verzerrung bei $T < T_c$





Soft-mode Übergang in SrTiO₃



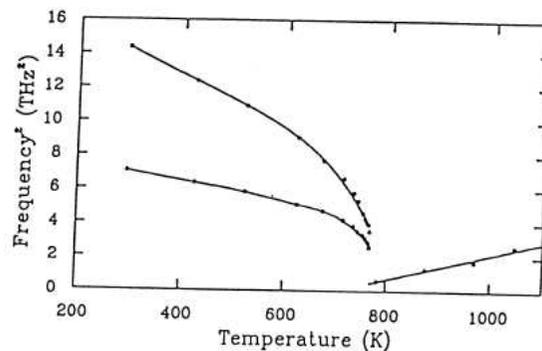
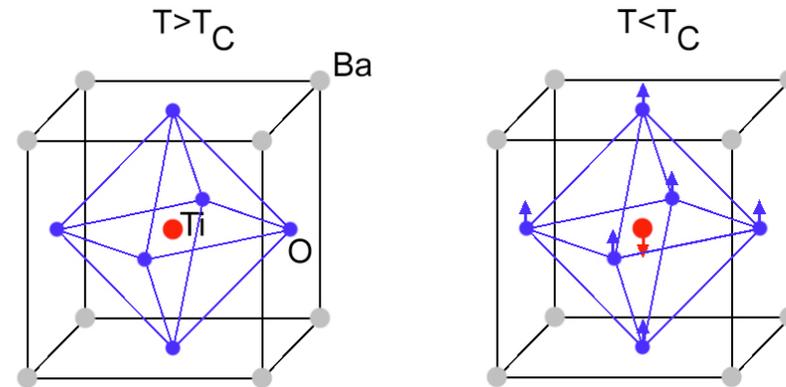
nahezu vollständiges Erweichen



Ferroelektrischer Übergang bei BaTiO₃

Bariumtitanat (BaTiO₃)

$T_c = 130^\circ\text{C}$



kubisch \perp nur 4 Gamma-Moden

-eine TO-Frequenz verschwindet nahezu

$\perp \epsilon(0) = \epsilon(\infty) \omega_{LO}^2 / \omega_{TO}^2$ divergiert

\perp technische Bedeutung

$\perp \chi$ proportional $1 / \omega_{TO}^2$

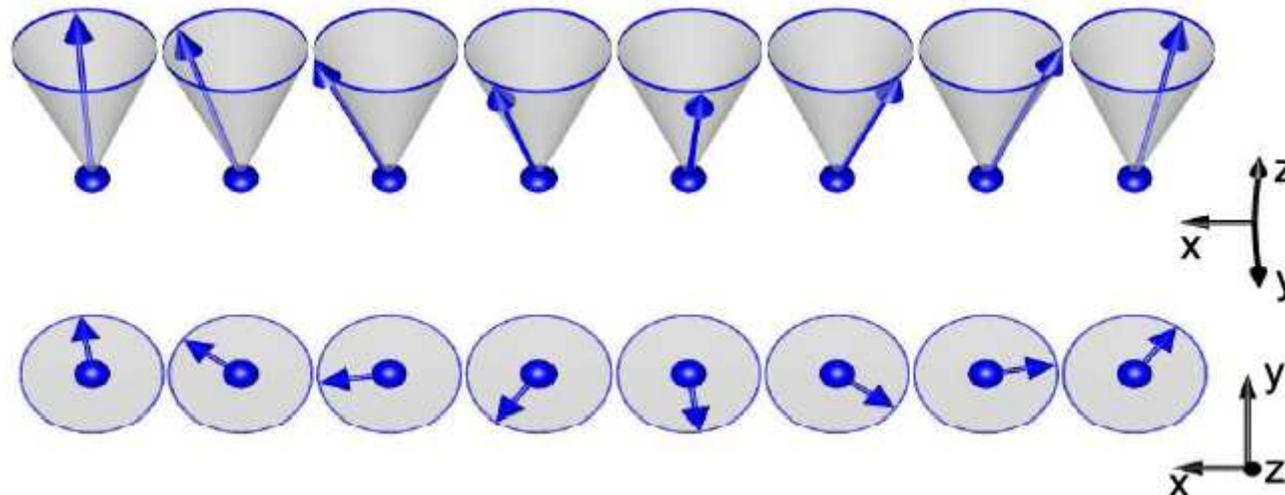


Magnon

Elementare Anregung einer magnetischen Ordnung : Spinnwelle

Energie wie beim Phonon gequantelt, also ähnlicher Name

Vorraussetzung ist magnetische Ordnung (Kopplung der Magnetischen Momente)

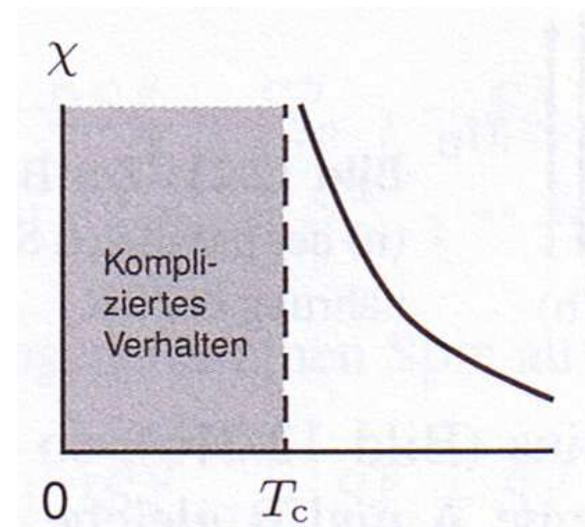




Ferromagnetischer Übergang

Paramagnet : $\chi_m = \frac{C}{T}$

Ferromagnet : $\chi_m = \frac{C}{T - T_C}$



Suszeptibilität divergiert bei T_c !

Allgemein : Phasenübergang zweiter Ordnung hat divergierende Suszeptibilität bei T_c



Divergierende Suszeptibilität bei kontinuierlichen Phasenübergängen

Ferroischer Übergang : kleines äußeres Feld \perp großer Effekt
ferro-elastisch
magnetisch
elektrisch

FM : makroskopische Suszeptibilität divergiert

AFM : $\chi(q_{AFM})$ divergiert entspricht $1/(\hbar \omega_{Magnon})^2$

Frage : Wie ist das bei einer Struktur ?

Ordnungsparameter : strukturelle Verzerrung

Feld : nicht trivial

Suszeptibilität : $1/(\hbar \omega_{Phonon})^2$



Was Passiert in Multiferroika ?

In Multiferroika sind Ferroelektrische und Ferromagnetische Eigenschaften eng gekoppelt, im Idealfall liegen sie gleichzeitig vor

Könnte zu Hybridisierten Phonon-Magnon Anregungen kommen





Das Goldstone Boson

Das Goldstone Theorem:

Bei spontaner Symmetriebrechung eines Physikalischen Systems entsteht eine Quasiteilchen-Anregung, das **Goldstone-Boson**

Bei Ferromagneten:

Symmetrie: Invarianz unter räumlichen Drehungen

Bei T_c wird die Magnetisierung von 0 verschieden und hebt damit die Symmetrie auf





1. Anregungen in Ferroelektrika und Ferromagneten

Phononen

Magnons

2. Messmethoden

Optische Spektroskopie

Neutronenstreuung

3. Anregungen in multiferroischen Materialien

TbMnO₃

Messungen





Optische Spektroskopie

Infrarot Spektroskopie:

- Photonen werden absorbiert
- Absorptions-, Reflexions- oder Absorptionsspektren
- $\hbar\nu = \hbar\omega$

Raman Spektroskopie:

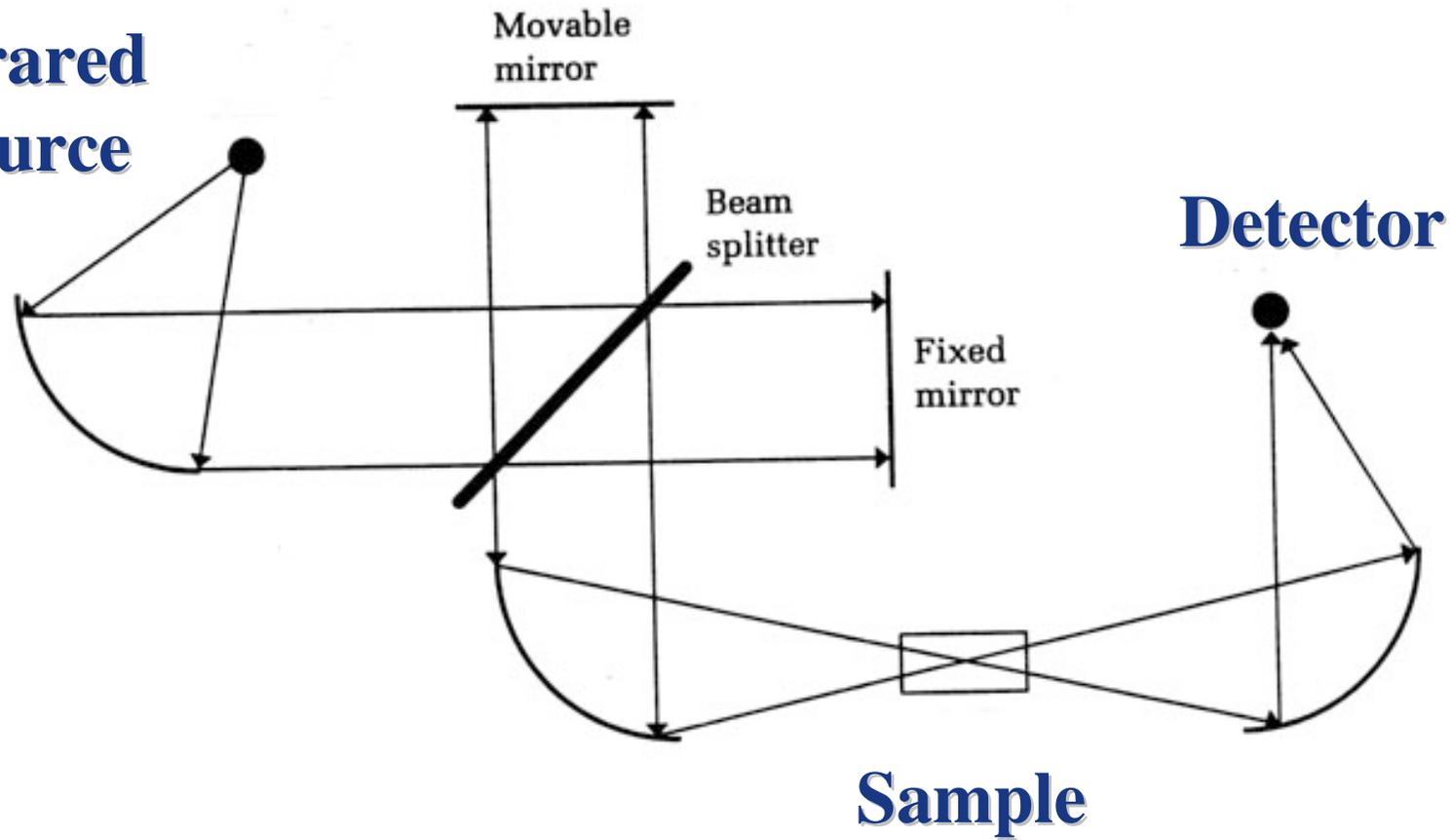
- Photonen werden inelastisch an den Phononen gestreut





IR-Spektroskopie

**Infrared
Source**



Detector

Sample

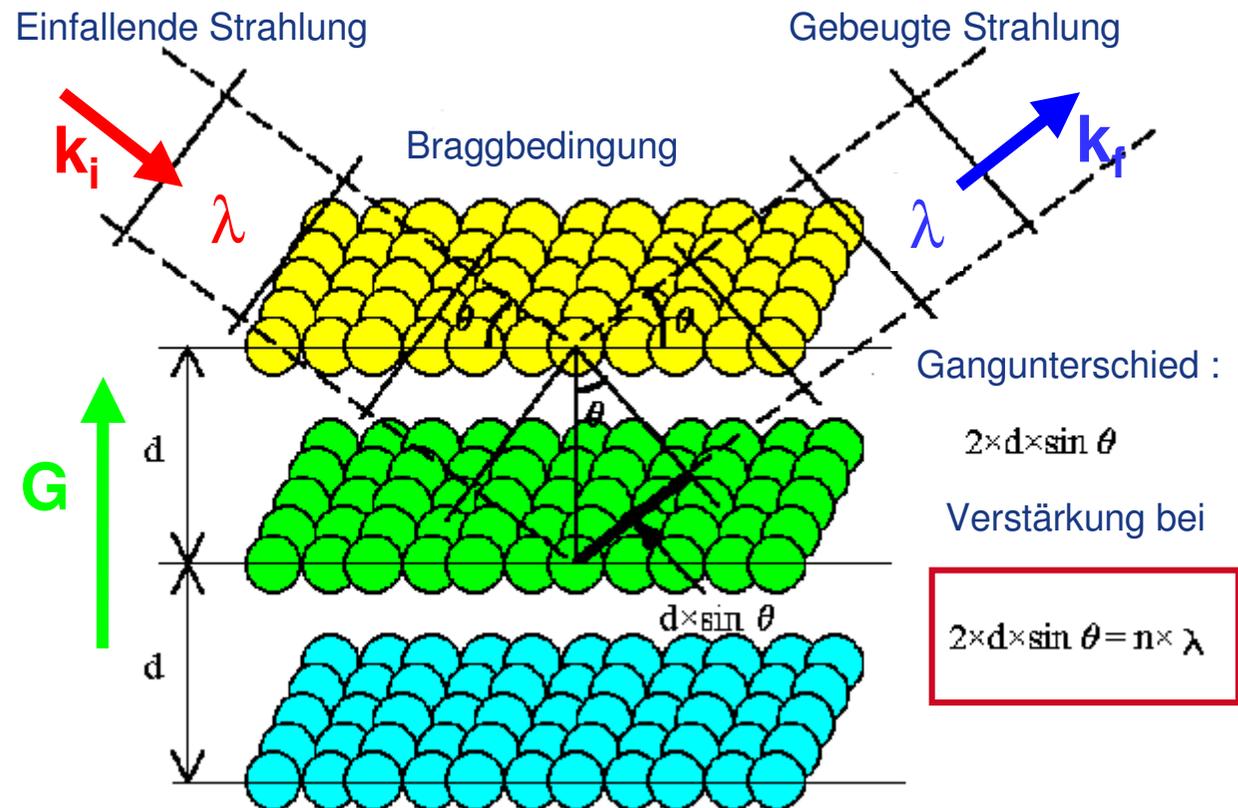


Neutronenstreuung

Reziproke Vektoren:

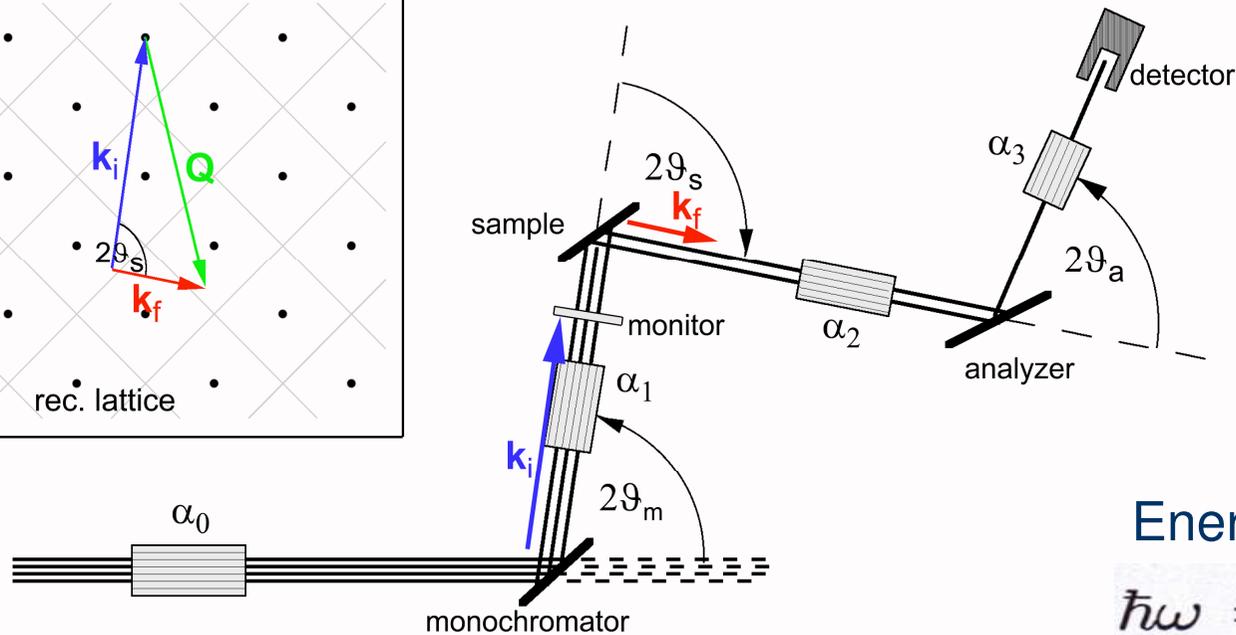
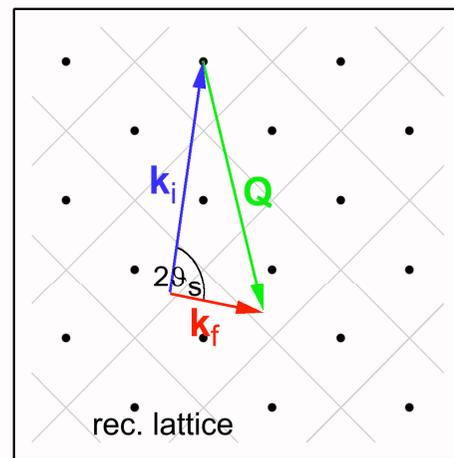
$$\mathbf{k} \quad \text{und} \quad |\mathbf{k}| = 2\pi/\lambda$$

$$\mathbf{G} \quad \text{und} \quad |\mathbf{G}| = 2\pi/d$$





Neutronenstreuung



Impulstransfer

$$Q = \vec{k}_f - \vec{k}_i$$

Energietransfer

$$\hbar\omega = \frac{\hbar^2}{2m_n} (k_i^2 - k_f^2)$$

Bragg-Reflexion an
monochromator Kristall

$$k_i = \frac{2\pi}{2d_M \sin 2\vartheta_M}$$



Longitudinal Polarisierete Neutronenstreuung

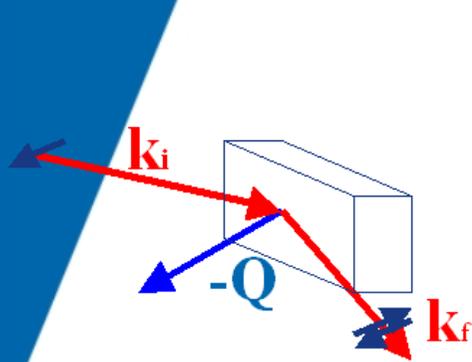
Hier werden nur Anregungen mit Polarisation senkrecht zur gewählten Polarisationsachse der Neutronen gemessen

Dadurch können Details der magnetischen Struktur wie z.B die die Eigenvektoren zu den Eigenfrequenzen gemessen werden

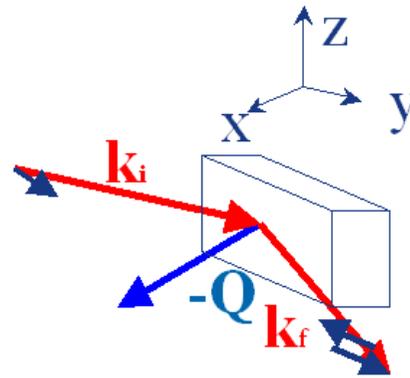




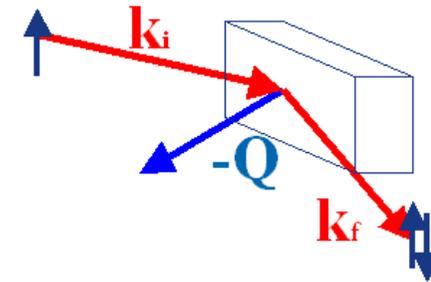
Longitudinal Polarisierte Neutronenstreuung



$P \parallel Q \parallel x$

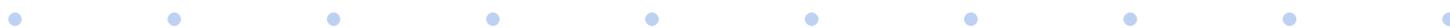


$P \perp Q, P \parallel y$



$P \perp Q, P \parallel z$

- inelastic neutron scattering : contribution $\perp \mathbf{Q}$ scattering vector
- neutron spin flip : contribution $\perp \mathbf{P}$ polarization





1. Anregungen in Ferroelektrika und Ferromagneten

Phononen

Magnons

2. Messmethoden

Optische Spektroskopie

Neutronenstreuung

3. Anregungen in multiferroischen Materialien

TbMnO₃

Messungen

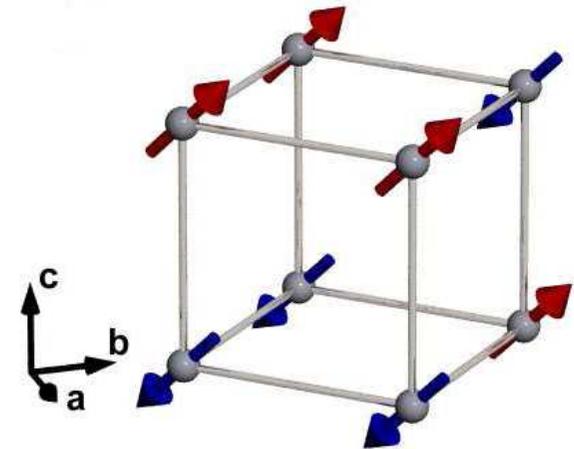
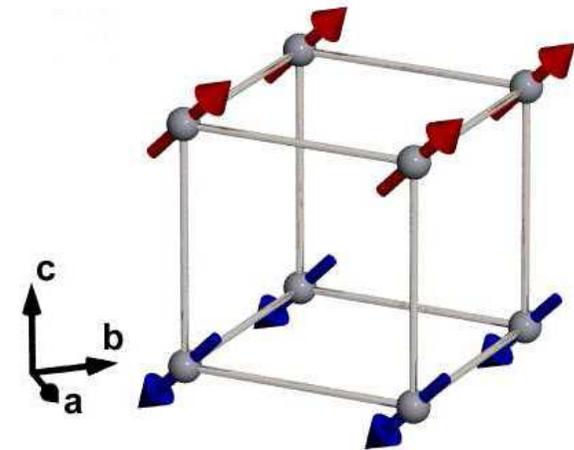
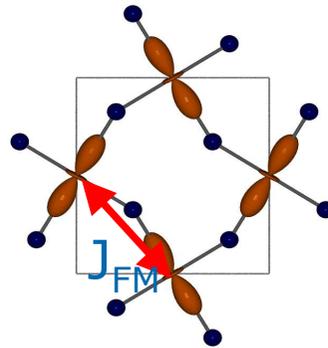
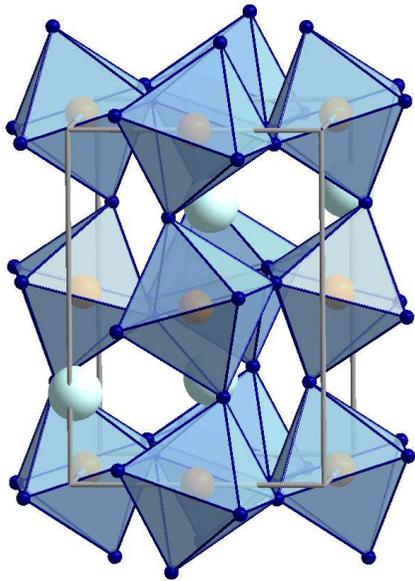




Frustration In TbMnO_3

LaMnO_3

- FM in **a,b**-Ebene
 - AFM entlang **c**
- ↔ **A-type**

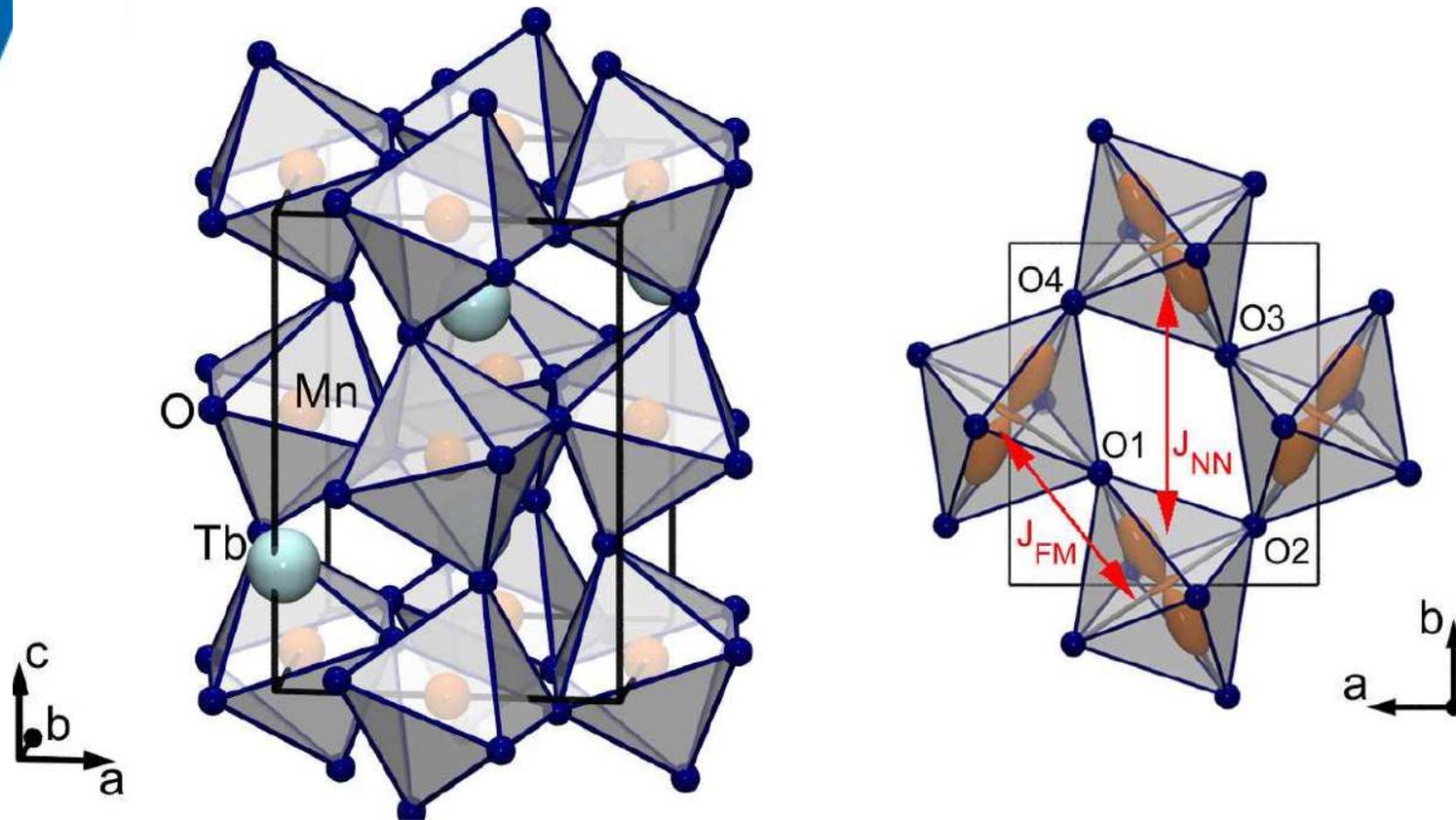


HoMnO_3

E-type



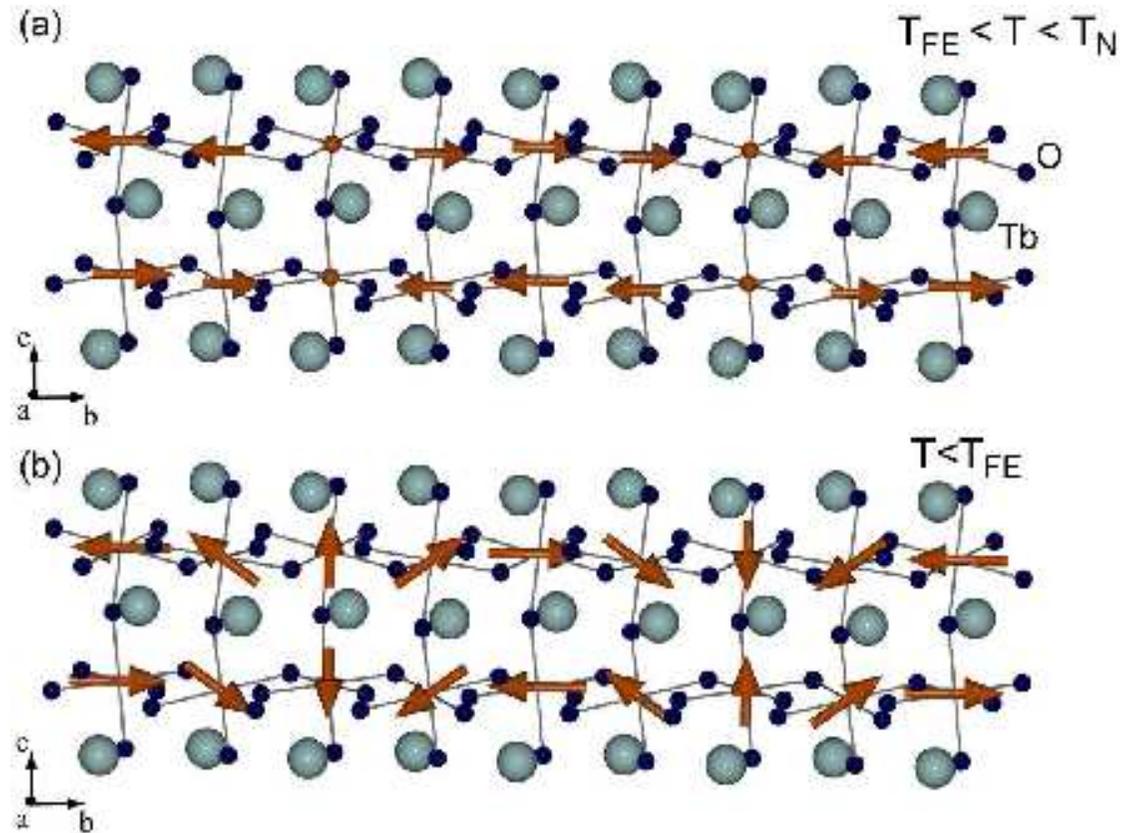
TbMnO₃ Gitterstruktur





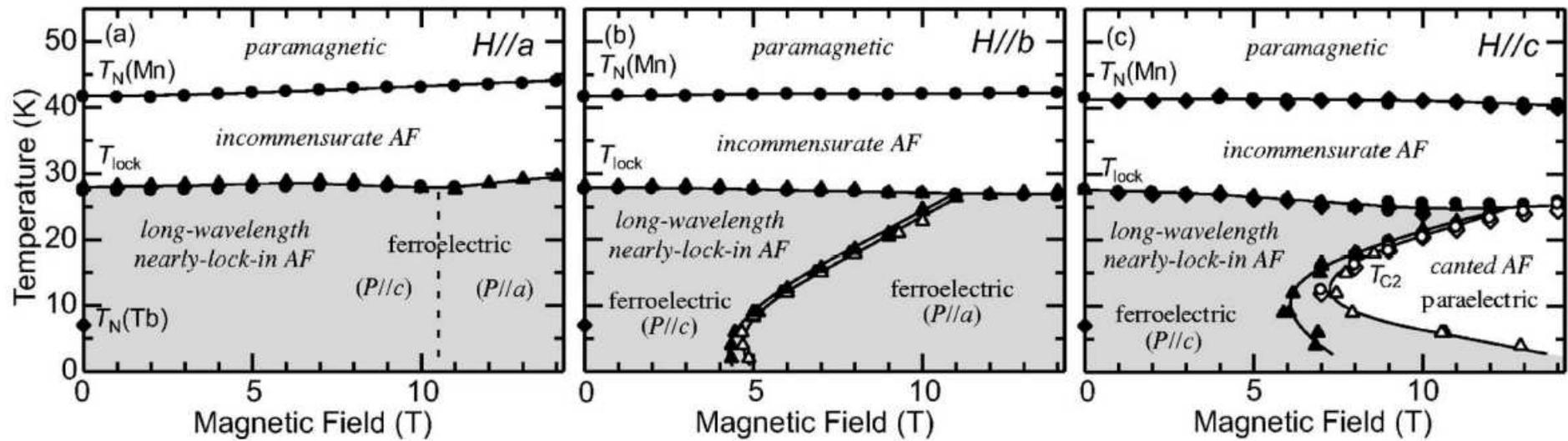
Magnetische Struktur

$$P \propto \sum_i r_{i,i+1} \times (S_i \times S_{i+1})$$





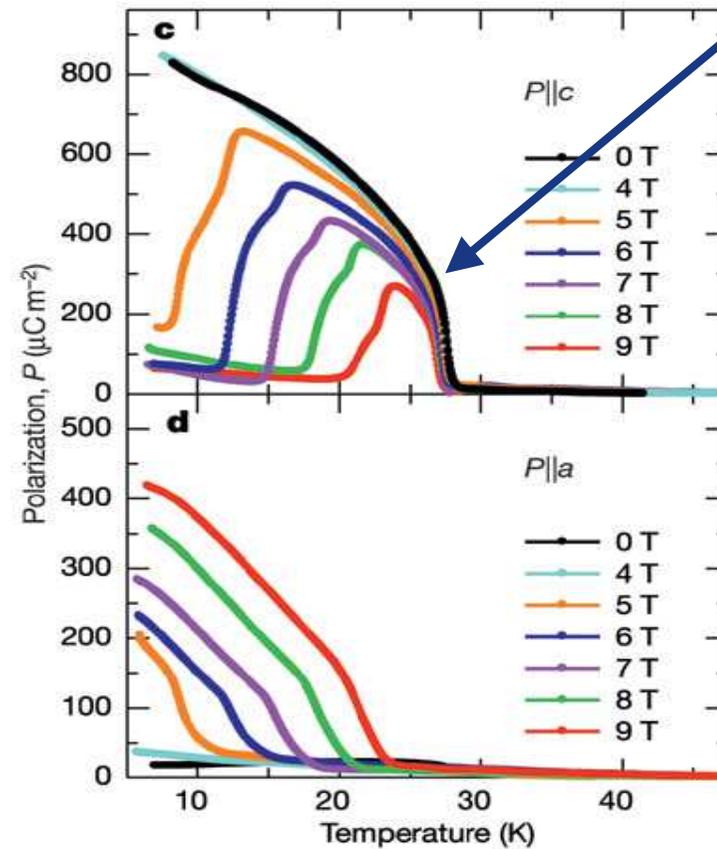
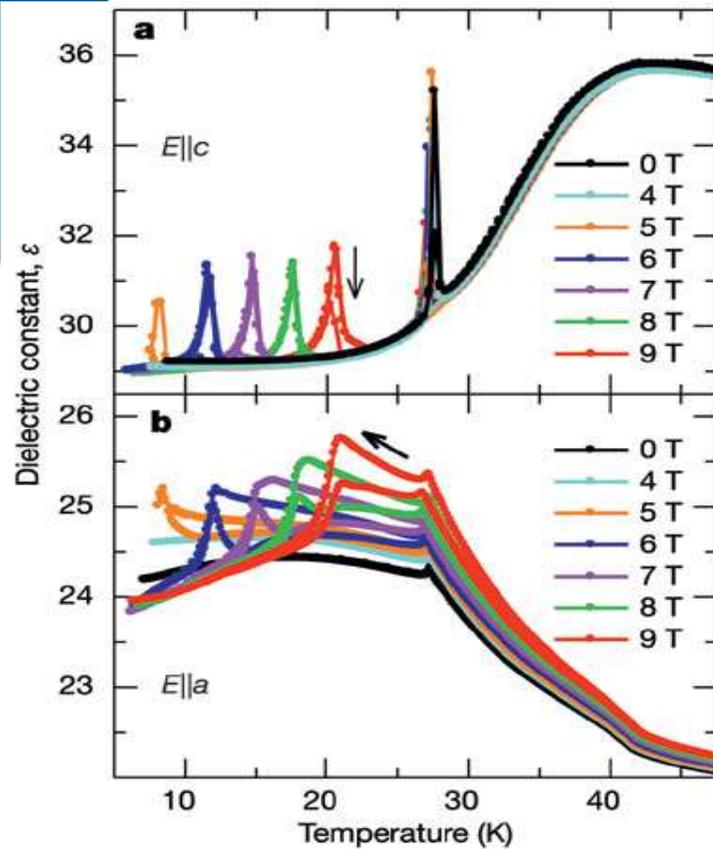
Phasendiagram





Induzierte Polarisierung

Kontinuierlicher multiferroischer Phasenübergang



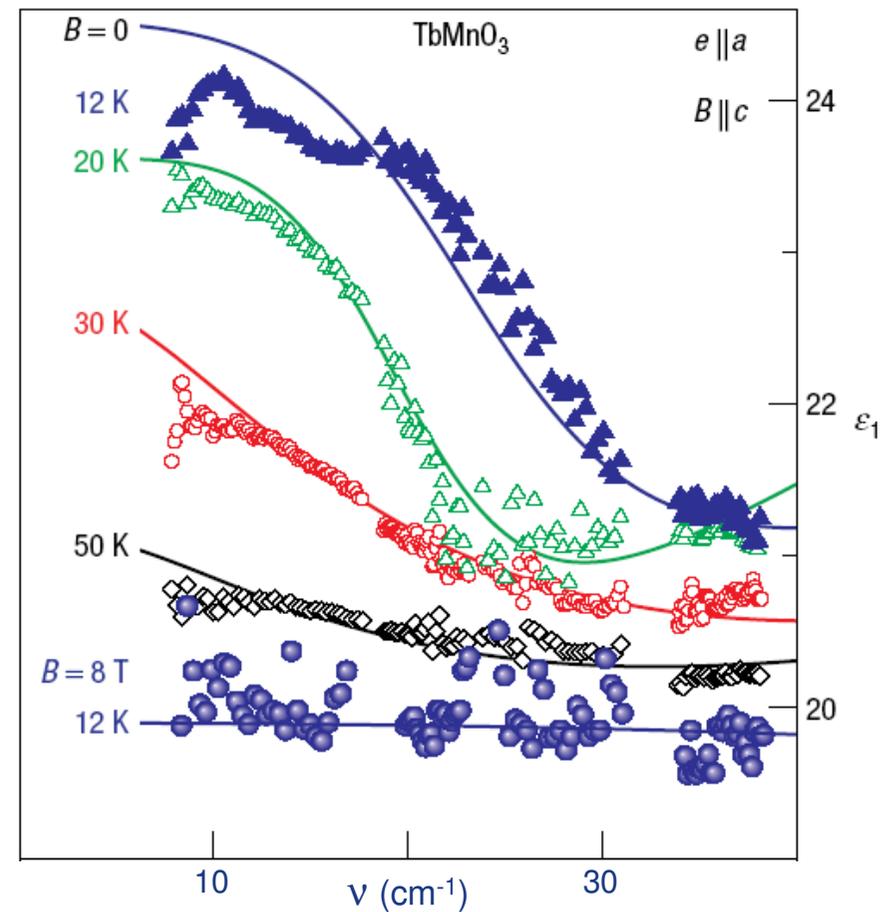


Elektromagnons

Optische Spektroskopie:
IR-Aktive Magnons für $\mathbf{E} \parallel \mathbf{a}$
IR

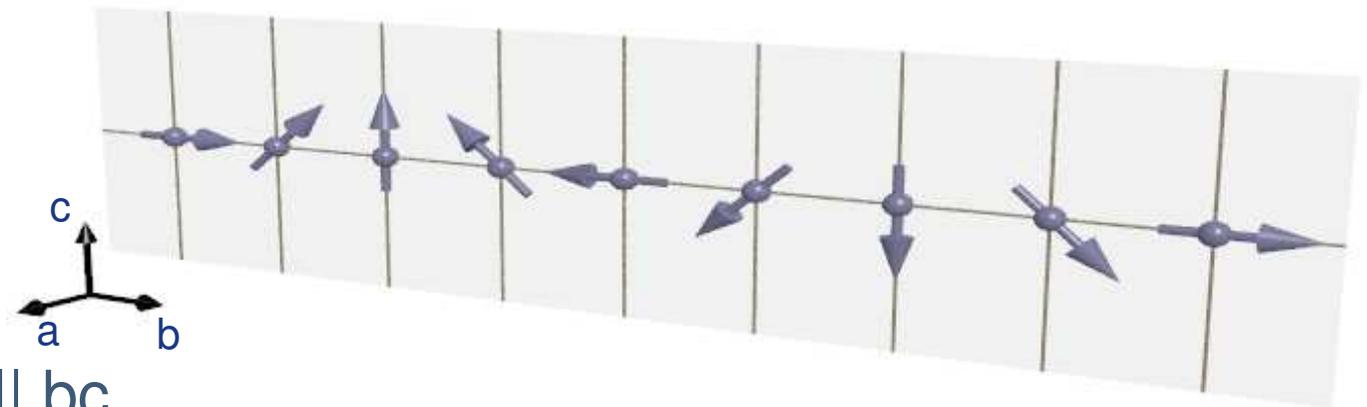
$$\omega_{\perp 2} \quad 2.48 \text{ meV}$$

$$\omega_{\perp 1} \quad 1.20 \text{ meV}$$





Magnetische Anregung im Spiralmagneten

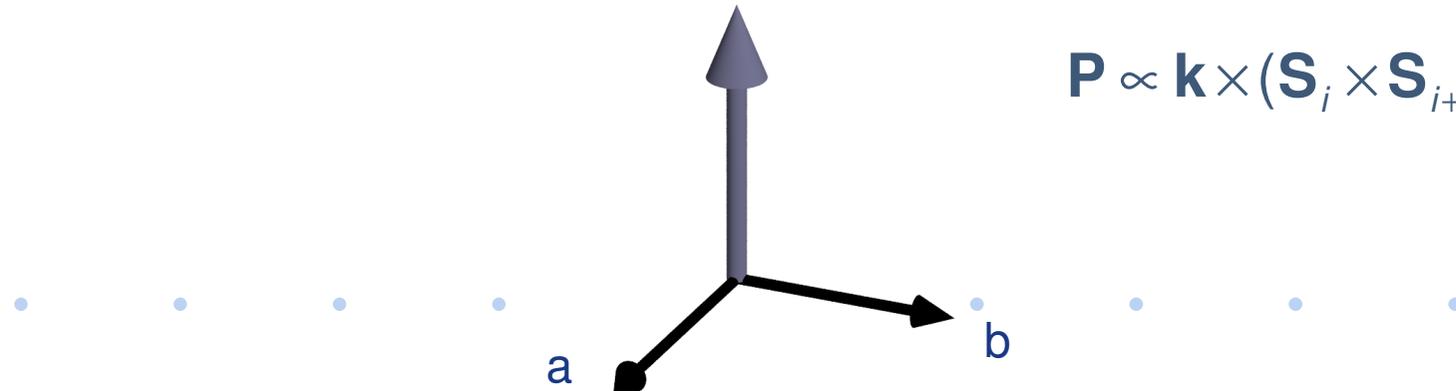


Spiralordnung $\parallel bc$

$$\mathbf{S}_i = S_b \cos(\mathbf{k}r_i) \mathbf{e}_b + S_c \sin(\mathbf{k}r_i) \mathbf{e}_c$$

Induzierte Polarisation

$$\mathbf{P} \propto \mathbf{k} \times (\mathbf{S}_i \times \mathbf{S}_{i+1})$$





Magnon Anregungen in der FE-Phase

FE-spiral Phase,
drei magnetische
Anregungen:

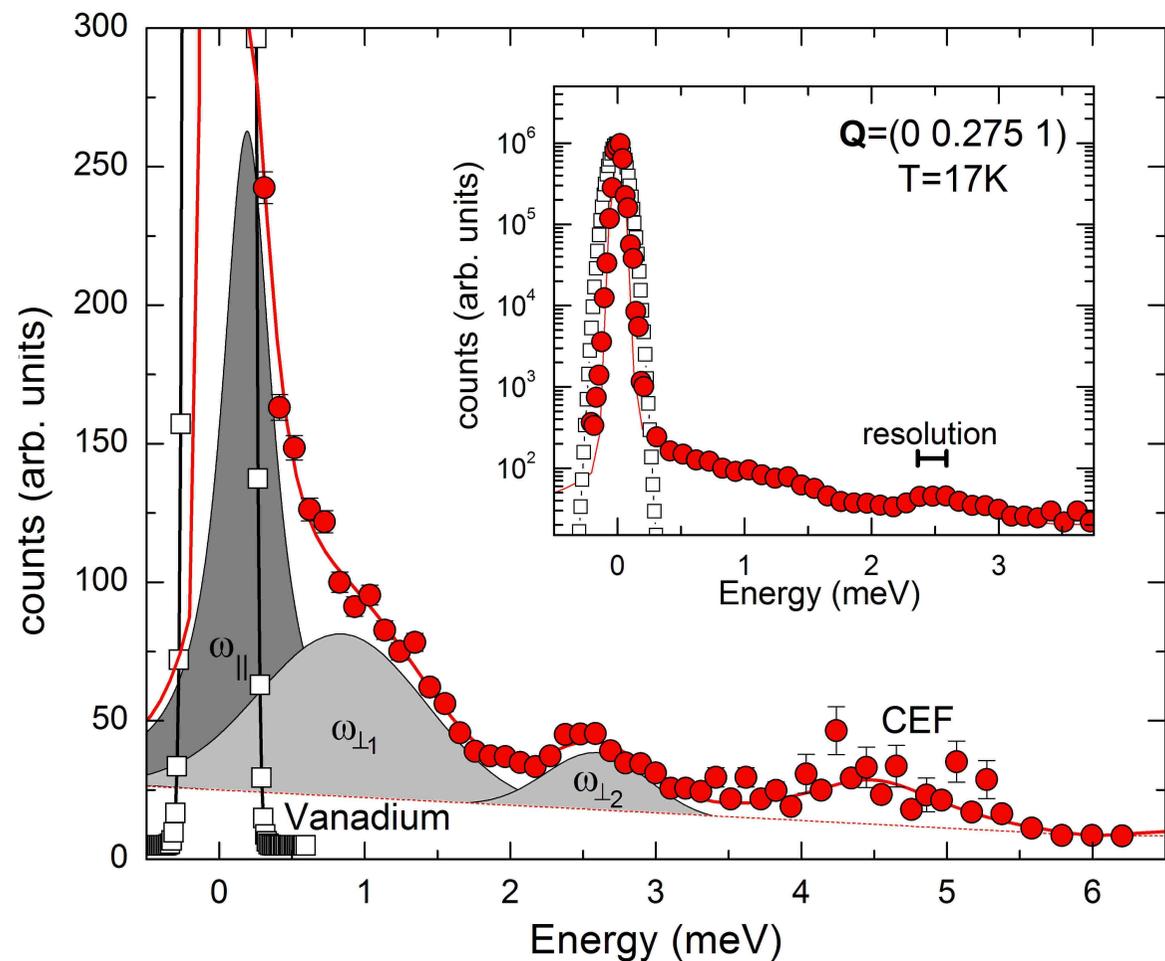
- **soft Mode**

$$\omega_{\parallel} < 0.15 \text{ meV}$$

- **orthogonale Moden**

$$\omega_{\perp 1} = 1.07 \text{ meV}$$

$$\omega_{\perp 2} = 2.50 \text{ meV}$$



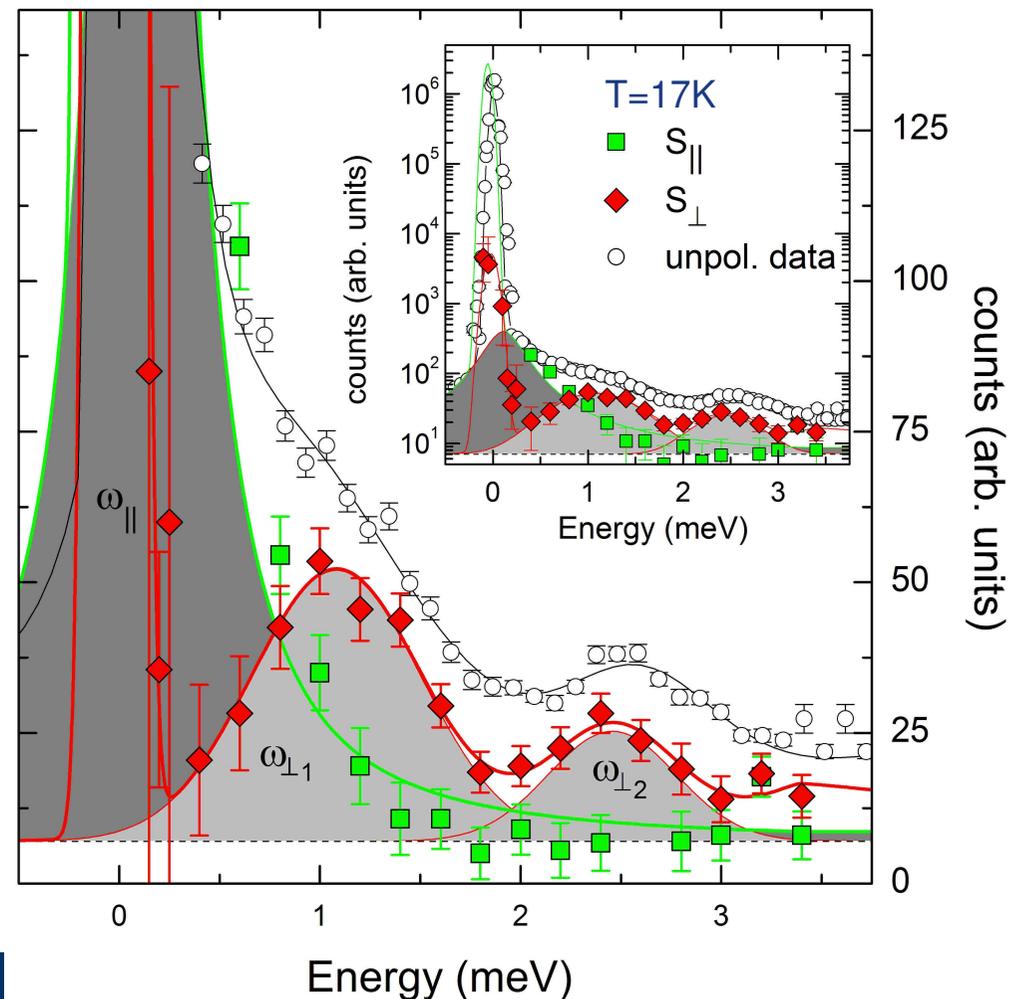


Magnon Anregungen in der FE-Phase

Analyse mit polarisierten Neutronen

soft Mode ω_{\parallel}
Bewegung \parallel Spiral-Ebene (bc)

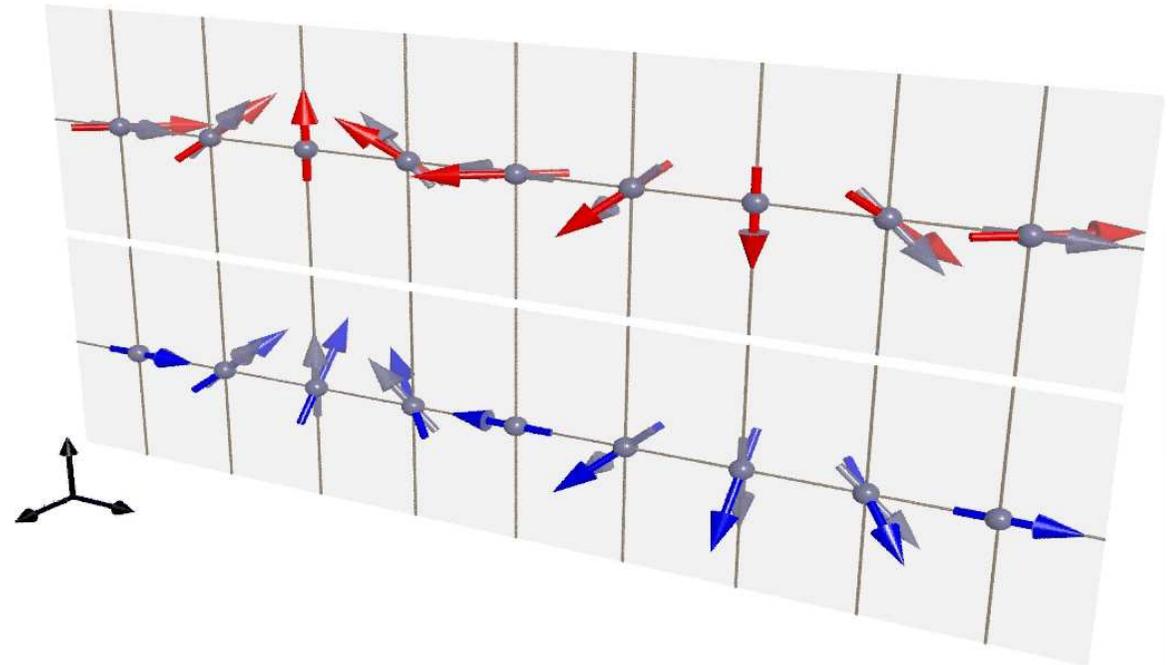
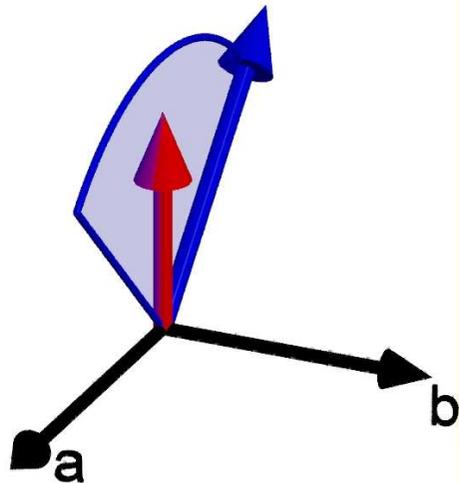
orthogonale Moden ω_{\perp}
Bewegung \perp Spiral-Ebene (a)





Magnetische Anregung im Cycloid-Magneten

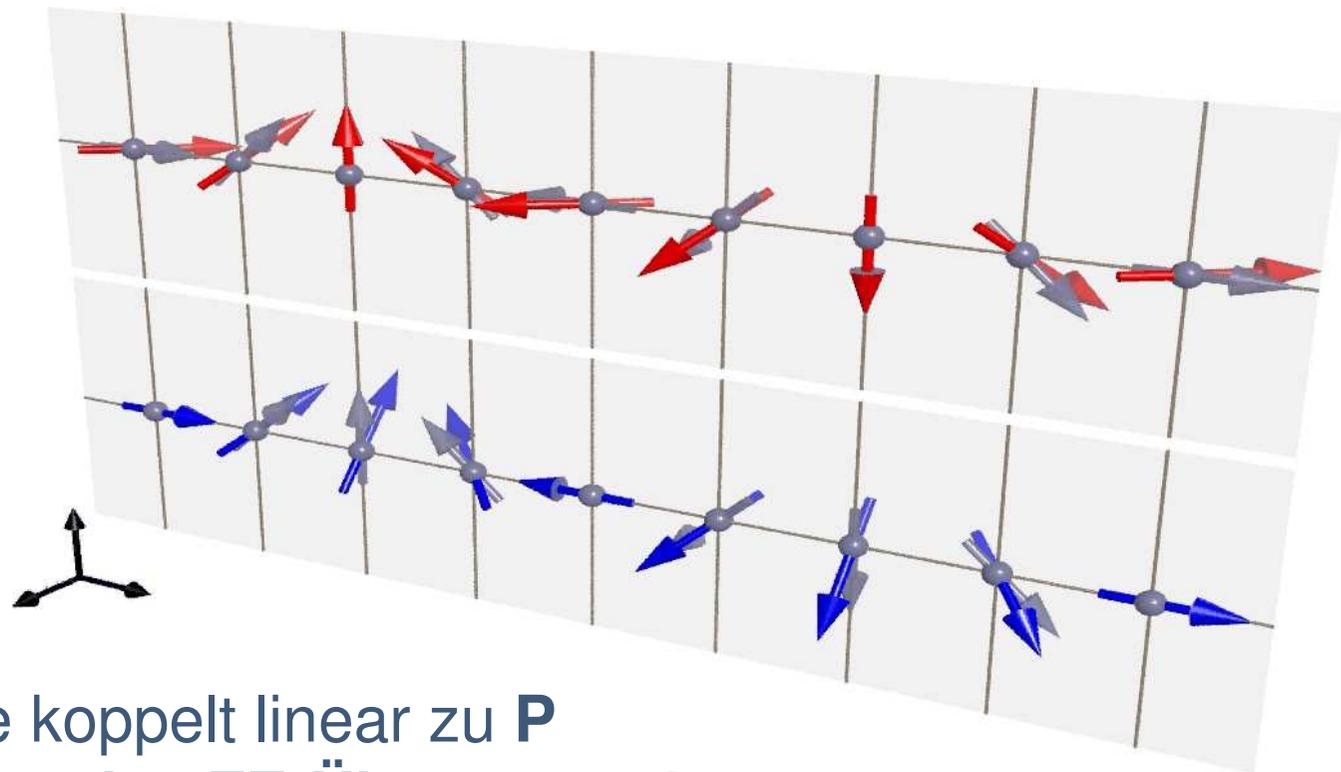
Bewegung $\parallel a$ kann
in-phase (cos)
out-of phase (sin)
zu S_b sein.



- Dynamische elektrische Polarisation



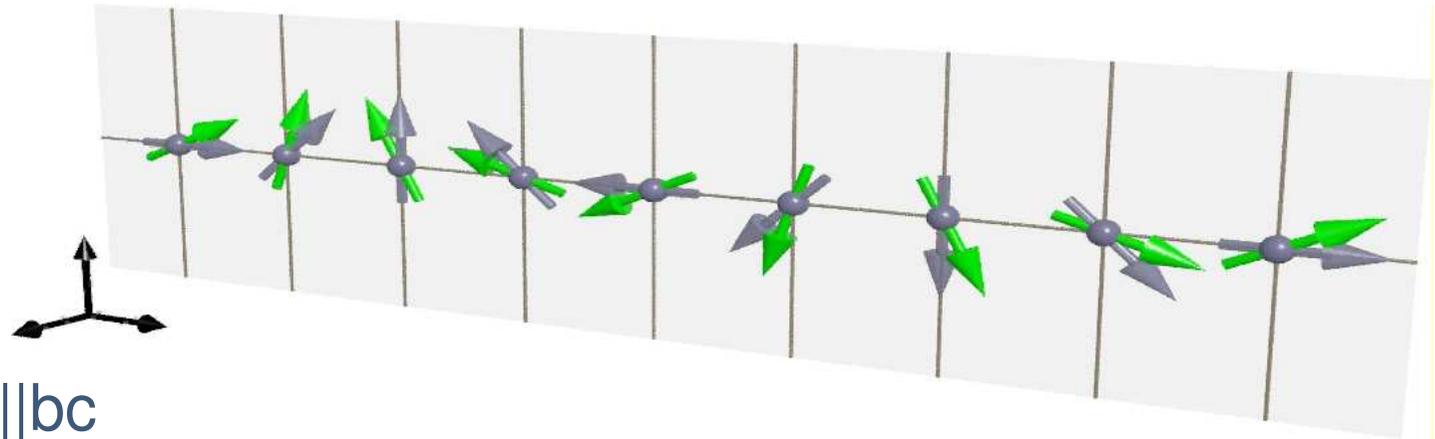
Magnetische Anregung im Cycloid-Magneten



Nur die sin-Mode koppelt linear zu \mathbf{P}
Goldstone-Boson des FE-Übergangs !



Magnetische Anregung im Cycloid-Magneten



Spiralordnung $\parallel bc$

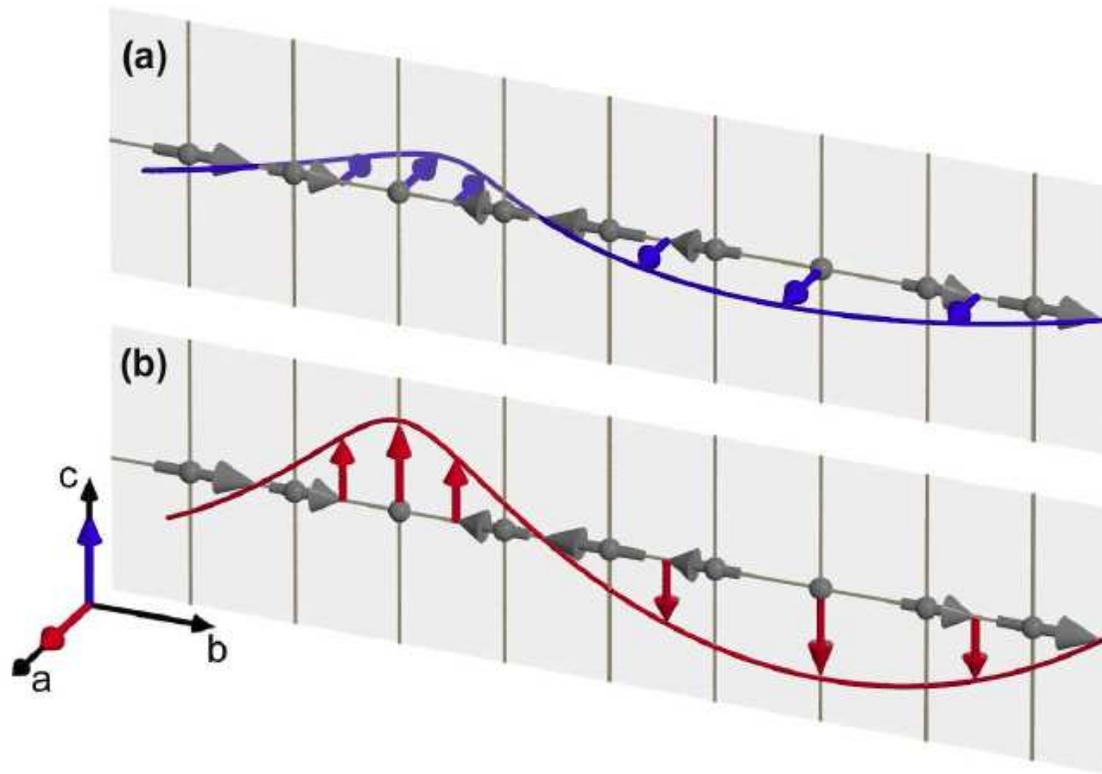
$$\mathbf{S}_i = S_b \cos(\mathbf{k}r_i) \mathbf{e}_b + S_c \sin(\mathbf{k}r_i) \mathbf{e}_c$$

phason-mode ω_{\parallel}
Polarisiert $\parallel bc$
Entkoppelt von \mathbf{P}

Induzierte Polarisation
 $\mathbf{P} \propto \mathbf{k} \times (\mathbf{S}_i \times \mathbf{S}_{i+1})$



Magnetische Anregung in der SDW Phase



$$\mathbf{S}_i = S_0 \cos(\mathbf{k}r_i) \mathbf{e}_b$$



Magnetische Anregung in der SDW Phase

SDW Phase, T=32K

- Schwingungen ||a

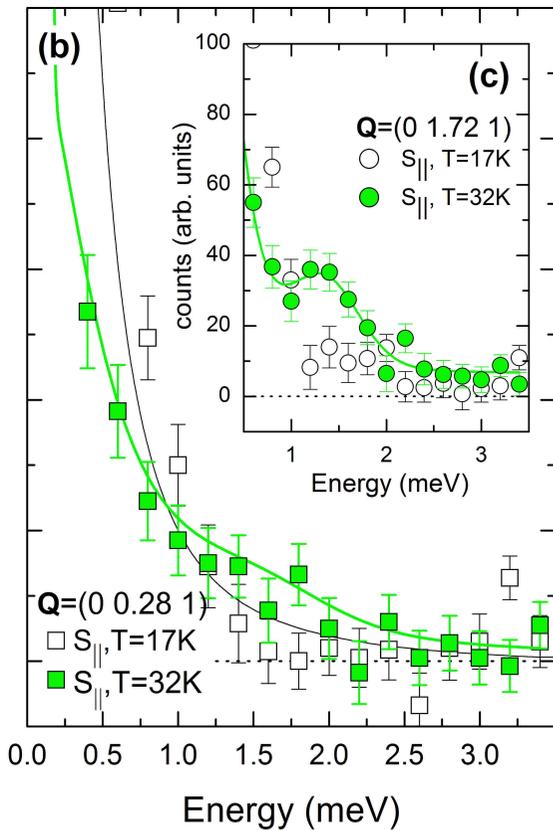
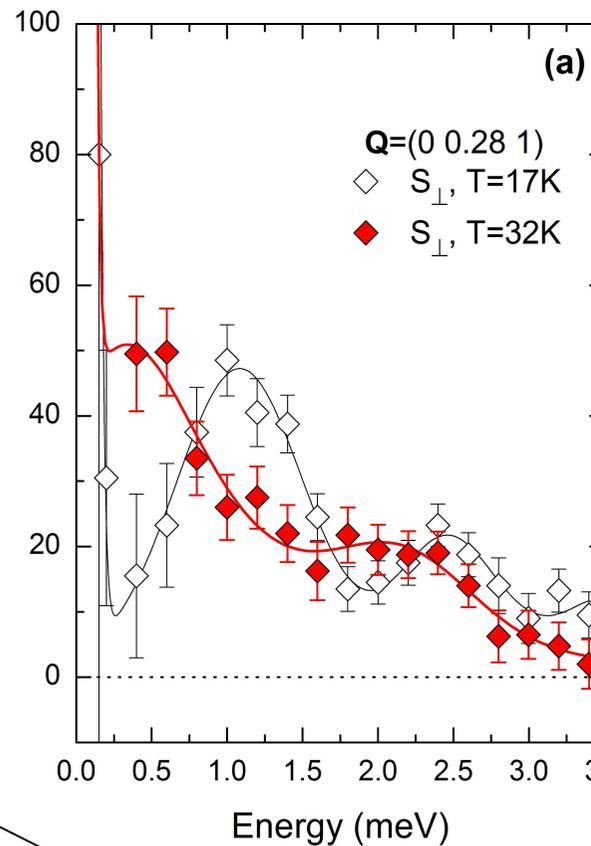
$$\omega_{a1} = 0.3(1)\text{meV}$$

$$\omega_{a2} = 2.16\text{meV}$$

- Schwingungen ||c

$$\omega_{c1} = 0.1(1)\text{meV}$$

$$\omega_{c2} = 1.32\text{meV}$$



Multiferroische Soft-Mode !



Zusammenfassung

FE Spiral Phase:

	IR	neutrons
$\omega_{\perp 2}$	2.48meV	2.50meV
$\omega_{\perp 1}$	1.20meV	1.07meV

„hybridized phonon-magnon excitation“

A. Pimenov et al.,
Nature Physics 2 ('06)

Paraelektrische SDW Phase:

4 Magnetische Anregungen

