Festkörperphysik

Vorlesung: Thomas Michely, II. Phys. Institut Raum 313, Tel 470 3583

e-mail: michely@ph2.uni-koeln.de

Termine

Mi 5.4. V2
Fr 7.4 Karfreitag, keine Vorlesung, keine Übung
Mi 12.4. V2
Fr 14.4 . V2, keine Übung
Mi 19.4. V2
Fr 21.4. V1 + Ü1
Mi. 26.4. V2
Fr. 28.4. V1 + Ü1
Mi 3.5. V2
Fr 5.5. V1+Ü1
Mi 10.5. V2 + 5min
Fr 12.5 Ü1, keine Vorlesung, Prof. auf Konferenz
Ausfall wird durch 9 x 5 Minuten längere Vorlesung mittwochs kompensiert
Mi 17.5. V2 + 5 min
Fr 19.5. V1+Ü1
Mi. 24.5 V2 + 5 min
Fr. 26.5. V1+Ü1

Mi 31.5. Pfingstferien
Fr. 2.6. Pfingstferien
Mi 7.6. V2 + 5 min
Fr 9.6. V1+Ü1
Mi 14.6. V2 + 5 min
Fr 16.6. V1+Ü1
Mi 21.6. V2 + 5min
Fr 23.6. V1+Ü1
Mi 28.6. V2 + 5 min
Fr 30.6. V1+Ü1
Mi 5.7. V2 + 5 min
Fr 7.7. V1+Ü1
Mi 12.7. V2 + 5 min
Fr 14.7. V1 + Ü1

Vorlesungszeit: - Mittwochs von 10.00 Uhr – 11.35 Uhr (5 Minuten Pause) bzw. 11:40 Uhr
- Freitags von 10.00 Uhr – 10.45 Uhr

Nach den Vorlesungen: gerne Fragen, Wiederholungen, Erläuterungen zum Vorlesungsstoff

Vorlesungsfolien: immer noch am selben Tag unter Ilias: https://www.ilias.uni-koeln.de/ilias/goto_uk_crs_5092392.html
Vorlesungsfilme: immer noch am selben Tag unter Ilias: https://www.ilias.uni-koeln.de/ilias/goto_uk_crs_5092392.html

Klausur

Do 20.7 Klausur 8:00 - 11:00 Uhr Hörsaal Physik 1
Fr 21.7. Einsichtnahme im Seminarraum II. Phys. Institut 14:00-15:00 Uhr } Termin evtl 1 Woche später

Di 12.9. Nachklausur 8:00 - 11:00 Uhr Hörsaal GeoBio
Mi 13.9 Einsichtnahme im Seminarraum II. Phys. Institut 14:00-15:00 Uhr

Übungen:

Übungsorganisation: Wouter Jolie, II. Phys. Inst. Raum 316,
Tel 470 34 80, e-mail: wjolie@ph2.uni-koeln.de

Übungstermine:	Freitags 9.00 Uhr – 10.00 Uhr, 1 Gruppe Freitags 10.00 Uhr – 11.00 Uhr, 1 Gruppe Freitags 11:00 Uhr – 12:00 Uhr, 1 Gruppe Freitags 12.00 Uhr – 13.00 Uhr, 1 Gruppe Freitags 14.00 Uhr – 15.00 Uhr, 2 Gruppen
Klausurzulassung	- 50% Übungspunkte, - 2 mal vorrechnen, - aktive Beteiligung - Gruppenarbeit (max 3 Studenten pro Übungszettel)
Anmeldung zur Übung:	Bei Klips unter https://klips2.uni-koeln.de/co/pl/ui/$ctx/wbLv.wbShowLVDetail?pStpSpNr=421980
Übungszettel:	Mittwochabend ab 18:00 Uhr bei Ilias unter https://www.ilias.uni-koeln.de/ilias/goto_uk_crs_5092392.html
1. Übungszettel:	Mittwoch, 12.4. ab 18:00 Uhr
Übungszettelabgabe:	Mittwoch, bis 8:00 Uhr bei Illias unter https://www.ilias.uni-koeln.de/ilias/goto_uk_crs_5145023.html
1. Übungszettelabgabe:	bis Mittwoch, 19.4. um 8:00 Uhr
Besprechung:	Freitag in der Übung, 2 Tage nach Abgabe

Bei Problemen mit Anmeldung etc. bitte e-mail an wjolie@ph2.uni-koeln.de

Letzte Probleme mit der Übungsgruppeneinteilung können nächsten Mittwoch nach der Vorlesung geklärt werden

Unabhängig von der Übungsgruppe wird es einige Übungsstunden in Englisch geben

Literatur:

K. Kopitzki: Einführung in die Festkörperpysik
S. Hunklinger: Festkörperphysik
H. Ibach, H. Lüth: Festkörperphysik
P. Hofmann: Solid State Physics
N. W. Ashcroft, N. D. Mermin: Festkörperphysik
C. Kittel: Einführung in die Festkörperphysik
R. Gross, A. Marx: Festkörperphysik
Bergmann-Schäfer, Festkörperphysik
W. Demtröder, Experimentalphysik, Bd. 3., Kap. 11-17

Inhalt der Vorlesung

1. Einleitung
2. Struktur von Kristallen
   - Bravais Gitter
   - Einfache Kristallstrukturen
   - Klassifizierung der Gitter
   - Kristallsymmetrien
   - Atomare aufgelöste Abbildung von Kristallen
3. Reale Kristalle
   - Punktdefekte
   - Versetzungen
   - Plastische Verformung und Bruch
   - Chemische Fehlordnung
4. Beugung
   - Das reziproke Gitter und Miller‘sche Indizes
   - Beugungsbedingungen und Ewald Konstruktion
   - Struktur- und Atomformfaktoren
   - Debye-Waller Faktor
   - Experimentelle Methoden der Strukturanalyse

5. Bindung
    - Grundlagen
    - Van-der-Waals Bindung und Adhäsion
    - Ionenbindung
    - Kovalente Bindung
    - Metallische Bindung
    - Wasserstoffbrückenbindung
    - Atom- und Ionenradien
6. Gitterschwingungen
    - Schwingungen in Kristallen mit einatomiger Basis
    - Gitter mit zweiatomiger Basis
    - Quantisierung der Gitterschwingungen und Phononen
    - Inelastische Streuung
7. Thermische Eigenschaften
    - Gitterbeitrag zur Wärmekapazität
    - Anharmonische Effekte
    - Wärmeleitfähigkeit

8. Das freie Elektronengas
    - Das Modell
    - Spezifische Wärme
    - Transportprozesse
9. Energiebänder
    - Blochfunktionen
    - Fast freie Elektronen im periodischen Potenzial
    - Stark gebundene Elektronen
    - Metalle, Halbmetalle, Halbleiter und Isolatoren
    - Fermiflächen
    - Messung von Bandstrukturen
11. Halbleiter
    - Allgemeine Eigenschaften und Bandstruktur
    - Eigenleitung und Störstellenleitung
    - p-n Übergang
    - Gleichrichtung
    - Solarzellen und Leuchtdioden
    - zweidimensionale Elektronengase
10. Supraleitung
    - Grundphänomene
    - Phänomenologische Beschreibung

0. Einleitung

wie in Schule → Festkörperphysik ← neu im Studium

Teilchenphysik	Festkörperphysik	Astrophysik
10^{-18} m	10^{-10} - 10^{0} m	10^{9} - 10^{25} m
r_e	Atom Kristall	SEM ϕ_U
ganz klein	Physik auf Längenskale des Menschen	ganz groß
Streuquerschnitt Quarks	Magneten pn-Übergang	schwarzes Loch Urknall

Teilchenphysik — Festkörperphysik — Astrophysik

wenige Partikel

10^{23} Atome mit e^- + Kerne und in starker WW

Subsysteme
Sonnensystem
Galaxis

$\Downarrow$

keine elementare Lösung der Bewegungsgleichungen (10^{23} Körperproblem)

$\Downarrow$

„effektive" Bewegungsgleichungen in „effektiven" Potentialen

$\Downarrow$ Näherung immer notwendig

$\Downarrow$ am einfachsten: Einkristalle $\hat{=}$ periodische Anordnung aller Bausteine

Idee: kennt man einen Baustein + Periodizität ⇒ Alles

gravierende Einschränkung

Festkörperphysik ≙ Physik periodisch angeordneter Atome oder Moleküle

tiefstes physikalisches Verständnis

Phänomene

- Magnetismus
- Supraleitung
- Elastizität
- Leitfähigkeit (Wärme + Strom)
- optische Eigenschaften

verallgemeinern: Einkristall + Defekte

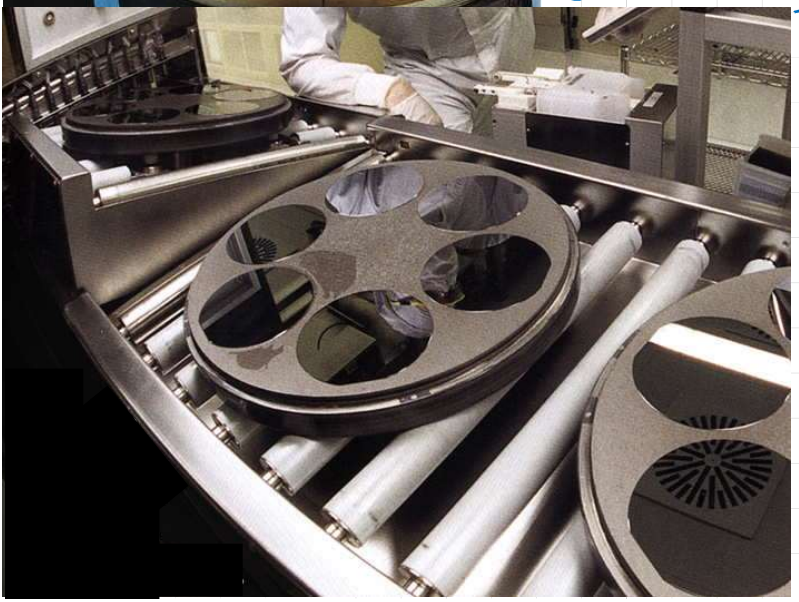
≙ realer Festkörper, Polykristalle

Konzepte auf 2D und 1D Festkörper übertragbar

Aufstieg der Festkörperphysik durch die Erfindung des Transistors

← fertiger Si-Einkristall nachdem Czochralski-Verfahren gezogen

geschnittene Einkristallscheiben (Wafer); Basis für Mikroelektronik und Photovoltaik



Kristall = Körper aus einer regelmäßigen Anordnung identischer Bausteine

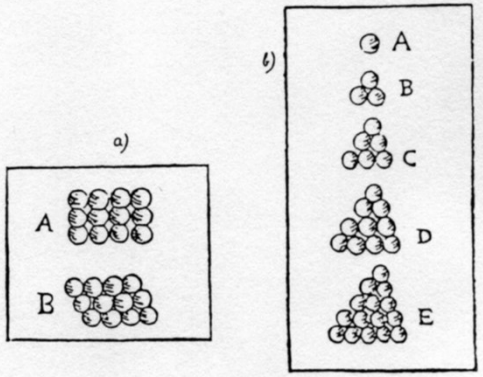


Fig.7. a. Packing models of spheres and b. the successive attachment of particles to achieve the hexagonal dense arrangement of snow crystals, from Kepler [18].

Kepler in „Strena seu de nive sexangula“, 1611

(Neujahrsgeschenk über den sechseckigen Schnee)

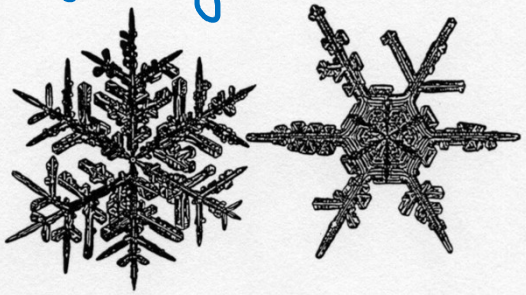
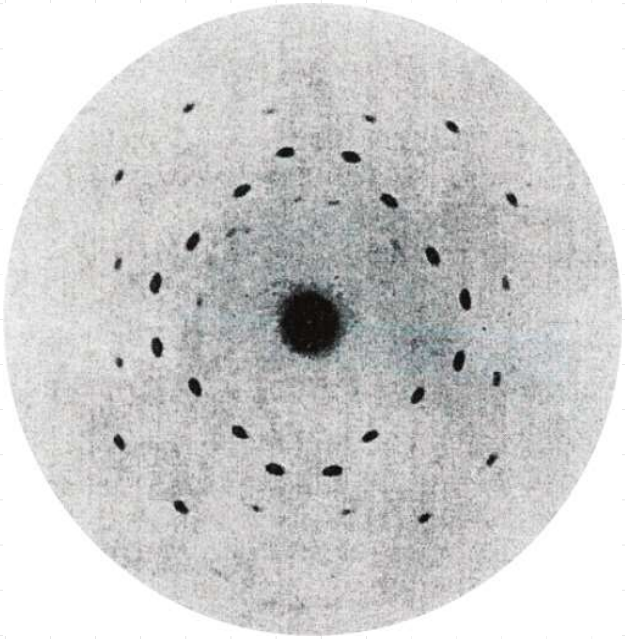


Fig.6. Snow flakes from the work "Kristallseelen" of E. Haeckel [16].

Beobachtung regelmäßiger Kristallformen

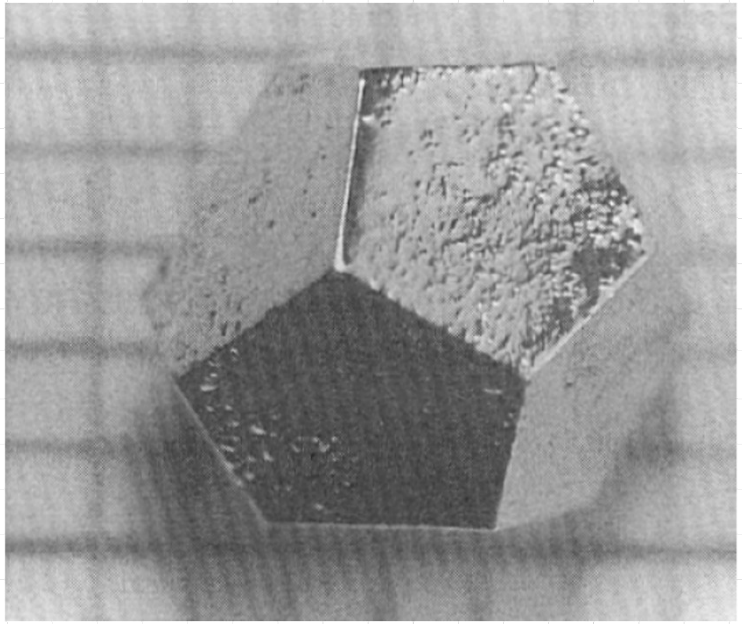
Beweis des Baustein-Konzeptes von Kristallen durch Röntgenbeugung. Knipping und Friedrich 1912 (Experiment)
Laue 1913 (Erklärung)



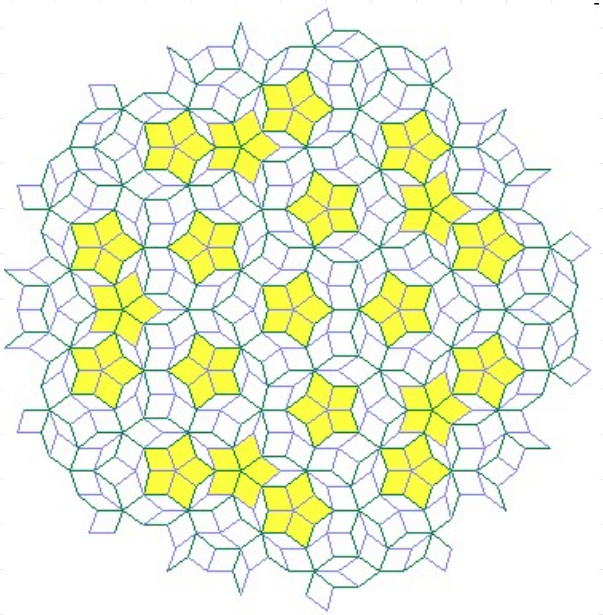
Beugungsbild eines ZnS-Kristalls
(Friedrich und Knipping)

Quasikristalle

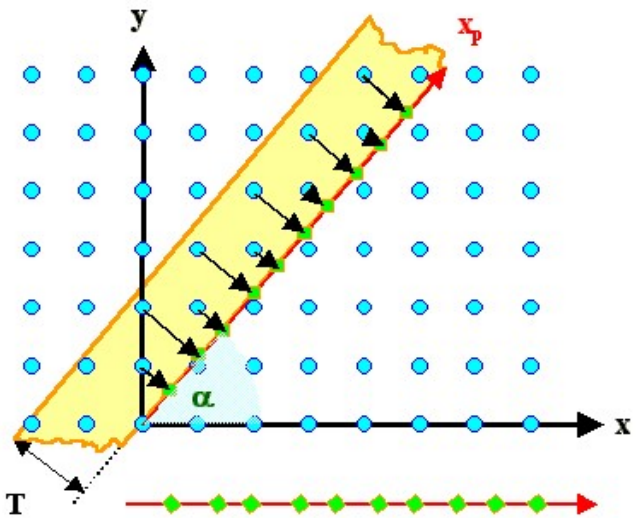
entdeckt 1982 von Dan Shechtman
2011 Nobelpreis für Chemie



„einkristalliner“ Ho-Mg-Zn Dodekaeder



Penrose-Parkettierung
(aperiodisches lückenloses Muster
aus 2 Kachelsorten)
5-zählige Rotationssymmetrie
keine Translationssymmetrie



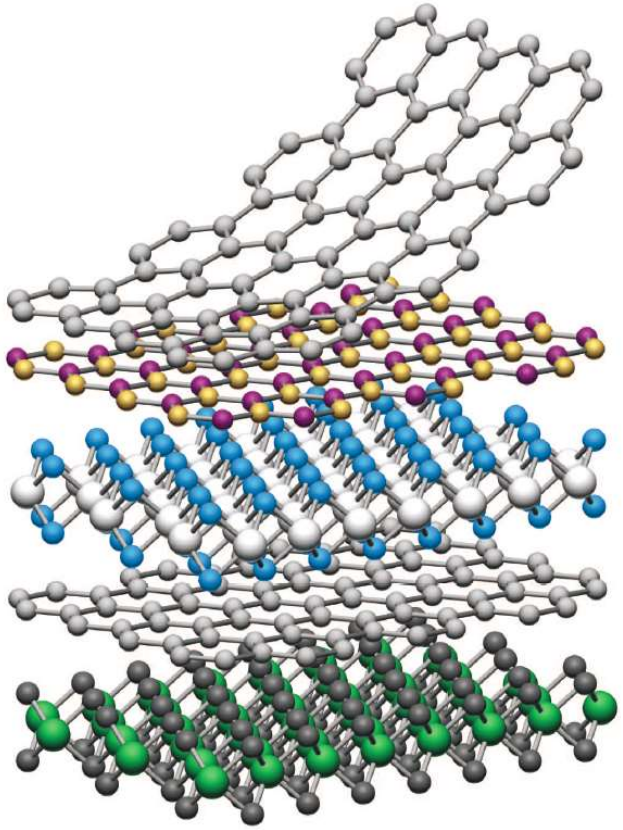
6D periodische Anordnung
wird von 3D Raum mit irrationalem
Winkel α durchdrungen.
Projektion aller Punkte mit Abstand
kleiner als Fixwert auf 3D Unterraum.
Dann Quasikristall in 3D Unterraum

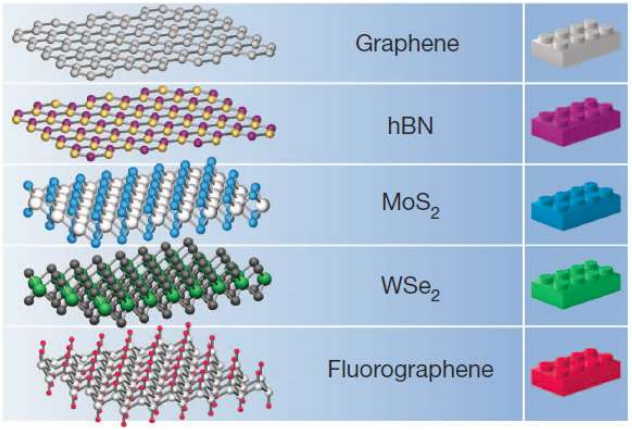
Aus: P. Thiel, Prog. Surf. Sci. 75 (2004) 69

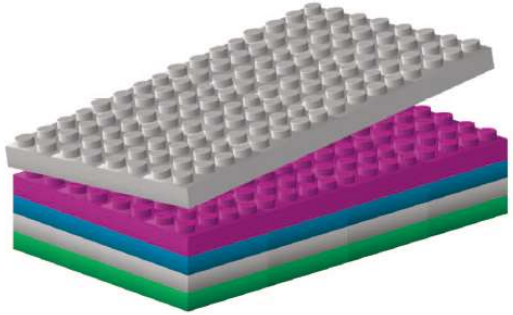
Figure 1 | Building van der Waals heterostructures. If one considers 2D crystals to be analogous to Lego blocks (right panel), the construction of a huge variety of layered structures becomes possible. Conceptually, this atomic-scale Lego resembles molecular beam epitaxy but employs different 'construction' rules and a distinct set of materials.

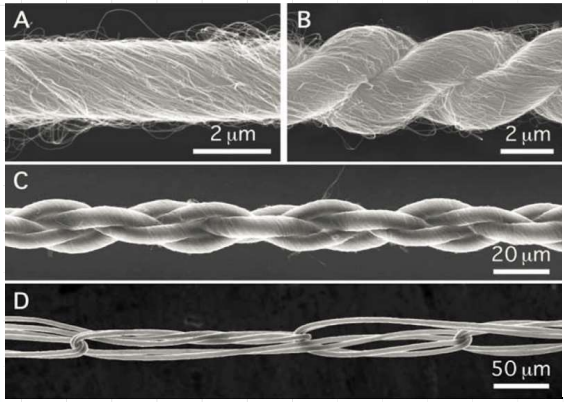
Zweidimensionale (2D) und eindimensionale (1D) Kristalle

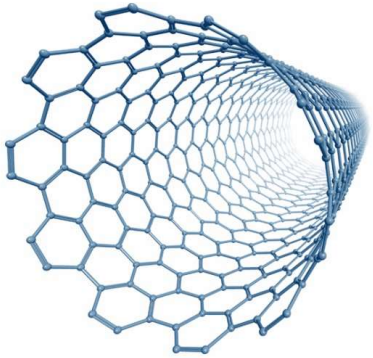
(aktives Forschungsgebiet in der II. Physik)

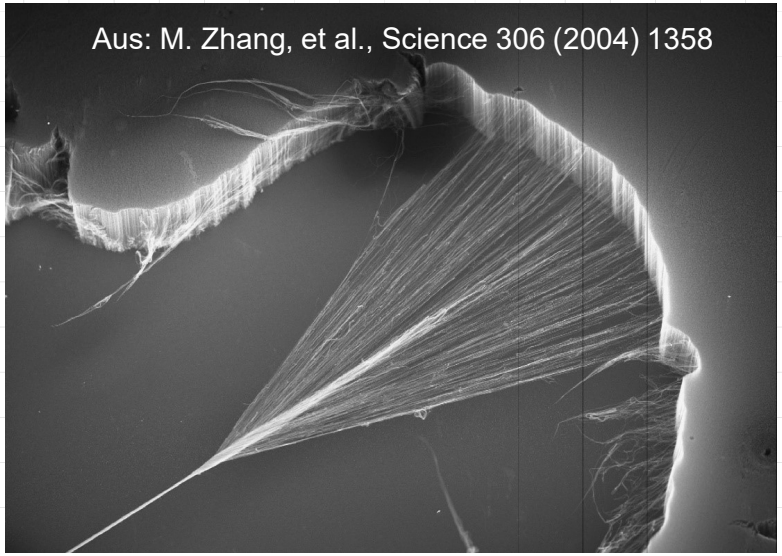






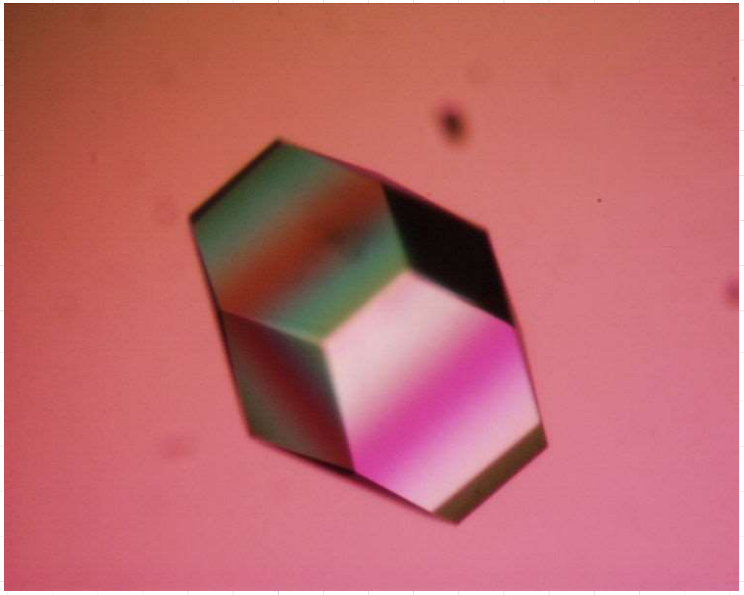




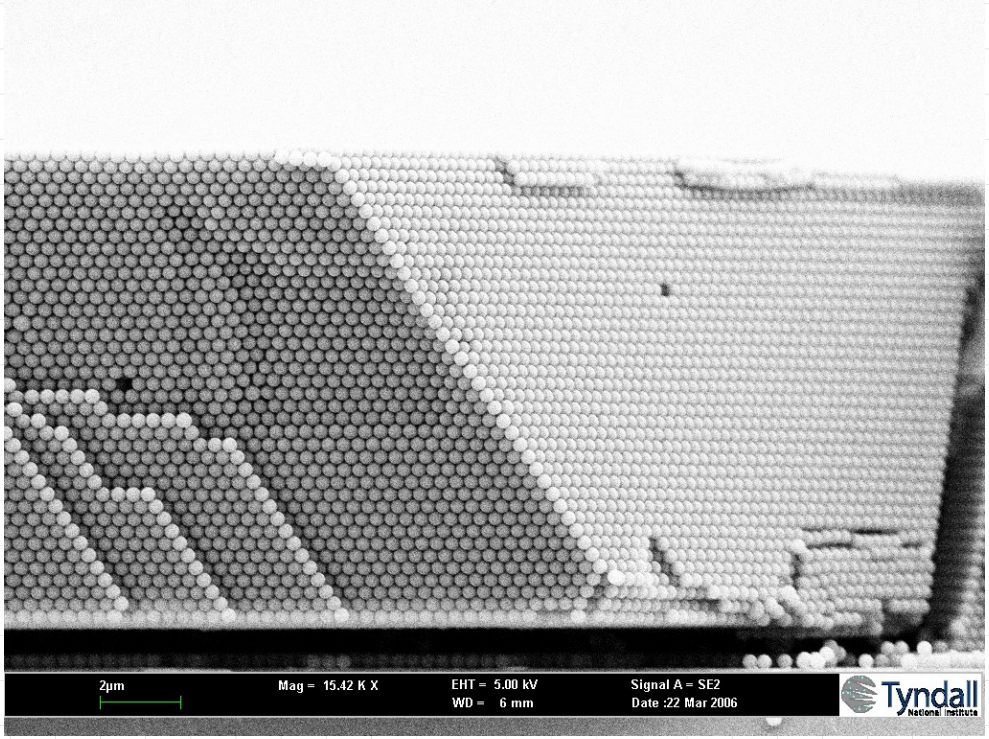


Aus: A.K. Geim, I.V. Grigorieva, Nature 499 (2013) 419.

Exotische Kristalle



Lysozym-Proteinkristall
Aufnahme mit optischer Mikroskopie



kolloidaler Einkristall aus PMMA-Kügelchen
Ø = 370 nm
Aufnahme durch Rasterelektronenmikroskopie

Kristallisation biologischer Moleküle ist Basis der Bestimmung der molekularen Struktur

Verhältnis der Festkörperphysik zur Physik der kondensierten Materie

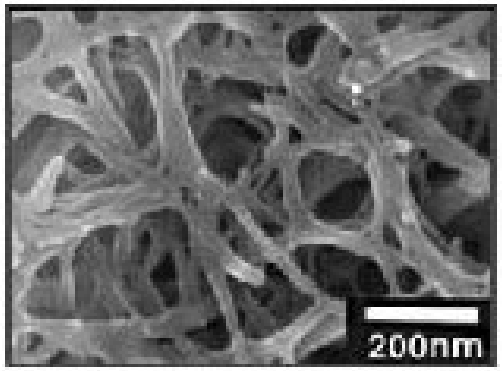
• Flüssigkeiten		inkompressibel, formunbeständig	H_2O
• weiche Materie	Flüssigkristalle	Fernordnung, formunbeständig	LCD
	Polymere	verkettete Monomere	PE, DNA
	Gele	Netzwerke fest; Poren flüssig/gasf.	Götterspeise
	kolloidiale Susp	kleine Teilchen im Medium	Blut, Tinte
• feste Körper	amorphe FK.	nur Nahordnung	Glas
	Quasikristalle	regelmäßig, nichtperiodisch	Ho-Mg-Zn
	Polykristalle	Kristallite, Korngrenzen	Stahl
	Einkristalle	regelmäßig, periodisch	Bergkristall
	2D Kristalle	" , atomar dünn	Graphen
	1D Kristalle	" , nur Rohre + Stangen	Nanotube

Arten weicher Materie

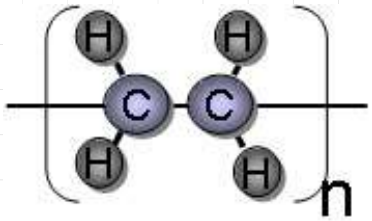
Götterspeise
Gel

Plastikschüssel
Polymer

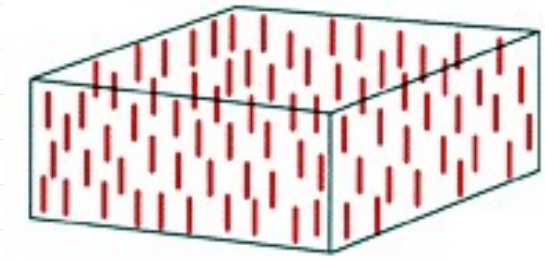
LCD
Flüssigkristall



Struktur eines Gels



Monomer

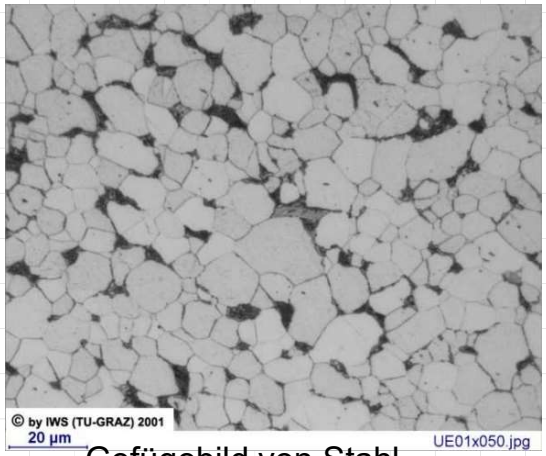


nematische Phase

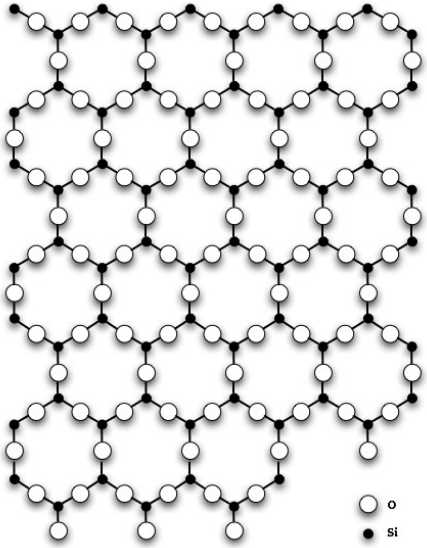
Einkristalline, amorphe und polykristalline Festkörper

Bergkristall

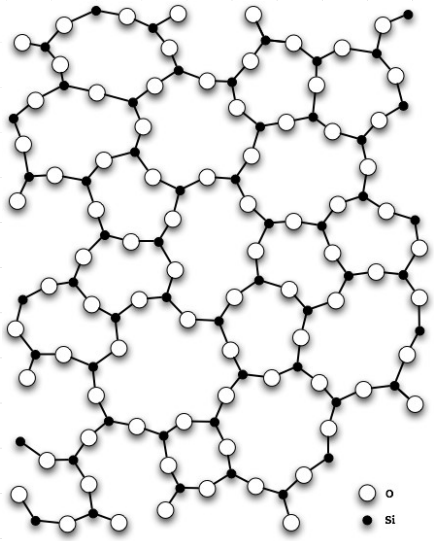
natürliches Glas



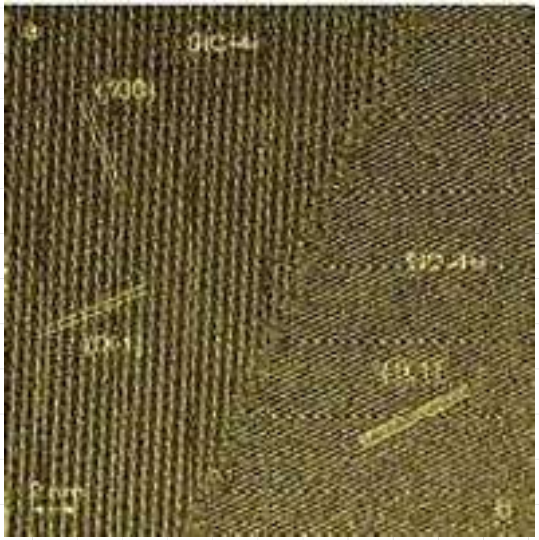
Gefügebild von Stahl



kristallines SiO_2 (Schema)



amorphes Si SiO2 (Schema)



TEM-Bild einer SiC Korngrenze

Festkörperphysik im II. Physikalischen Institut

AG Ando: Topologische Isolatoren, Synthese und Transport

AG Bocquillion: elektronischer Transport in Mikro- und Nanobauelementen

AG Braden: Neutronenstreuung an Kristallen, Kristallzucht

AG Grüninger: optische Spektroskopie an Kristallen und Schichten

AG Hemberger: dieelektrische Spektroskopie an Kristallen und Schichten

AG van Loosdrecht: zeitaufgelöste optische Spektroskopie

AG Lorenz: Transport und thermodynamische Größen, Kristallzucht

AG Michely: 2D-Materialien und Oberflächen, Rastertunnelmikroskopie/-spektroskopie

Peter Grünberg (Nobelpreis in Physik 2007) war Professor in Köln

Nobelpreise seit 2007 im Bereich Festkörperforschung

2007:
Peter Grünberg, Albert Fert:
Entdeckung des Riesenmagnetwiderstandes

2007:
Gerhard Ertl
Studien von chemischen Reaktionen auf festen Oberflächen (Chemie)

2009:
Charles Kao, Williard Boyle, George Ellwood:
Fiberoptik und Erfindung des CCD Sensors

2010:
André Geim, Kostja Novoselov:
Grundlegende Experimente mit Graphen

2011:
Dan Shechtman
Entdeckung der Quasikristalle (Chemie)

2014:
Isamu Akasaki, Hiroshi Amano, Shuji Nakamuram
Entwicklung der blauen Leuchtdiode

2016:
David J. Thouless, F. Duncan M. Haldane, J. Michael Kosterlitz
Theorie der topologischen Phasenübergänge und topologischer Phasen der Materie

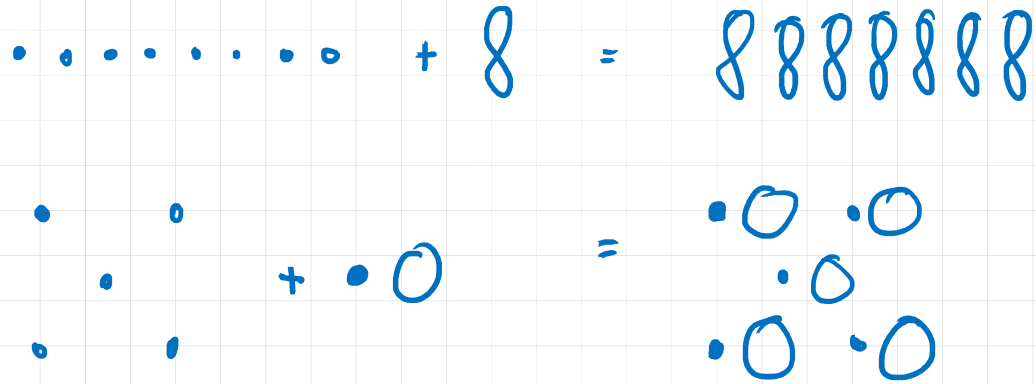
1. Struktur von Festkörpern

$$\boxed{\text{Gitter} \quad + \quad \text{Basis} \quad = \quad \text{Kristallstruktur}}$$

math. Objekt, Punktgitter

Atome, Moleküle, Makromoleküle angeheftet an jeden Gitterpunkt

Beispiel



Achtung: Die Basis einer Kristallstruktur hat nichts mit der Basis eines Vektorraums zu tun.

1.1 Bravais Gitter

Nur bestimmte Gitter sind in unserer Beschreibung sinnvoll – Bravais Gitter

Definition:

(a) Ein Bravais Gitter ist eine sich ins Unendliche erstreckende Anordnung von Punkten, die von jedem dieser Punkte aus gesehen exakt identisch aussieht.

(b) Ein Bravais Gitter besteht aus allen Punkten mit Positionsvektoren

$$\vec{R} = n_1 \vec{a}_1 + n_2 \vec{a}_2 + n_3 \vec{a}_3$$

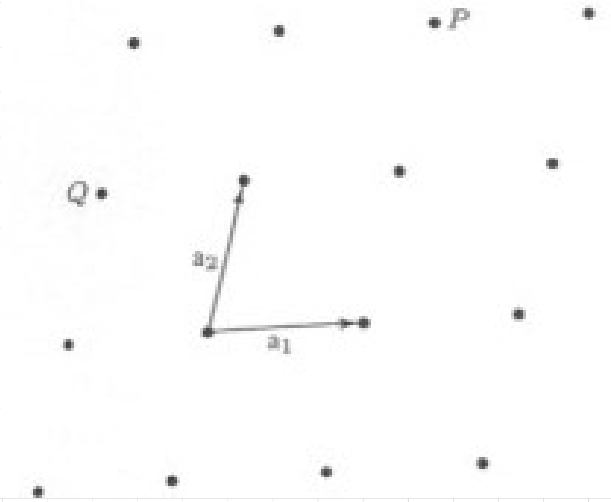
wo $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3$ nicht in einer Ebene und $n_i \in \mathbb{Z}$ $\quad i = 1,2,3$

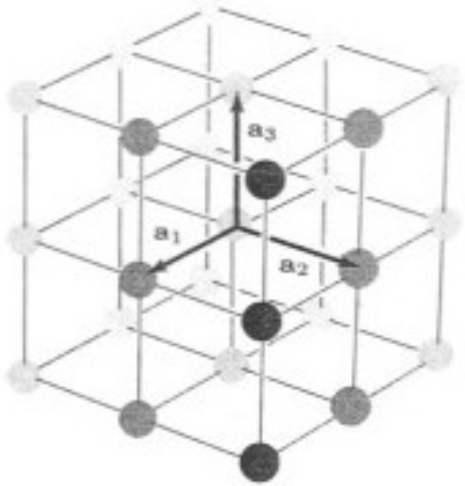
(a) $\Leftrightarrow$ (b)

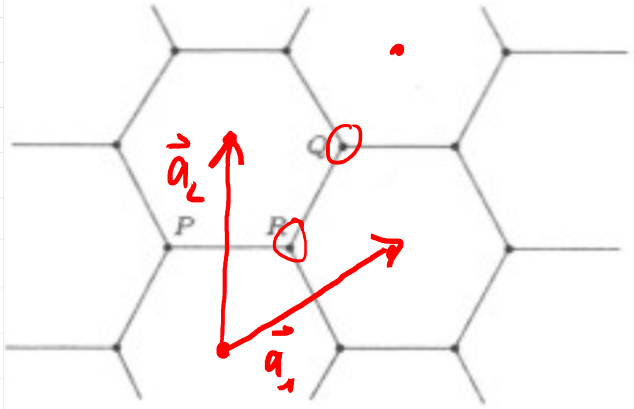
Die Vektoren $\vec{a}_i$ heißen primitive Translationen

Achtung: Die Vektoren $\vec{a}_i$ sind keine Basisvektoren im physikalischen Sinn

Beispiele







2D - Bravaisgitter

einfach kubisches Gitter (simple cubic [SC] lattice)

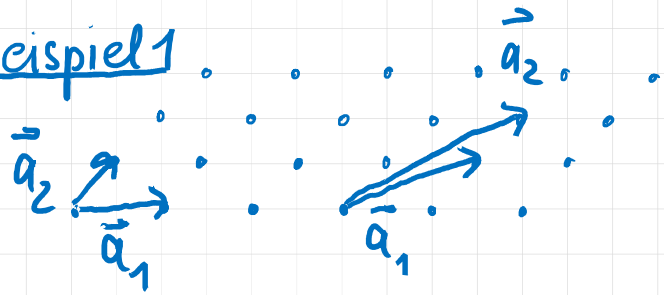
Honigwabengitter ist kein Bravaisgitter

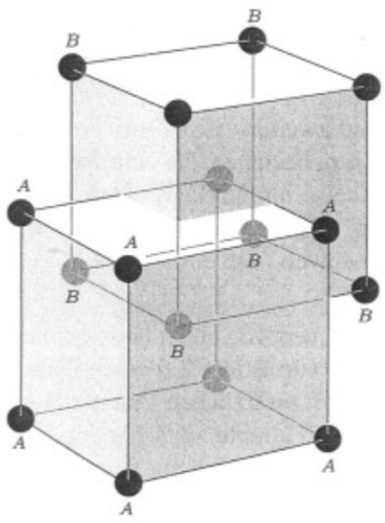
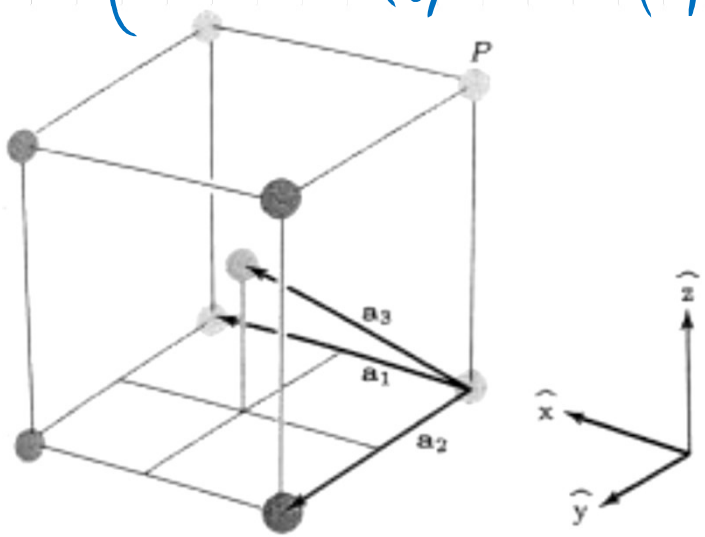
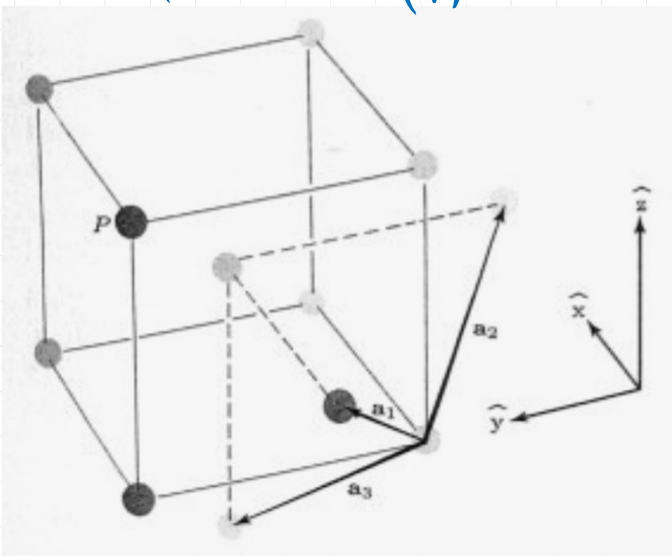
unendliches Gitter $\hat{=}$ gute Approximation für reale Kristalle $\approx 10^{23}$ Atome

Oberfläche hat nur $(10^{23})^{2/3} \approx 10^{15}$ Atome

Wahl der primitiven Translation ist nicht eindeutig.

Beispiel 1



Beispiel 2: Das raumzentrierte kubische Gitter (body centered cubic lattice, bcc lattice) ist ein Bravais Gitter, denn auch der Mittelpunkt des Würfels kann als Ecke eines Würfels betrachtet werden.

$$\vec{a}_1 = a\begin{pmatrix}1\\0\\0\end{pmatrix},\ \vec{a}_2 = a\begin{pmatrix}0\\1\\0\end{pmatrix},\ \vec{a}_3\ \frac{a}{2}\begin{pmatrix}1\\1\\1\end{pmatrix}\qquad \vec{a}_1 = \frac{a}{2}\begin{pmatrix}-1\\1\\1\end{pmatrix},\ \vec{a}_2 = \begin{pmatrix}1\\-1\\1\end{pmatrix}\cdot\frac{a}{2},\ \vec{a}_3 = \frac{a}{2}\begin{pmatrix}1\\1\\-1\end{pmatrix}$$