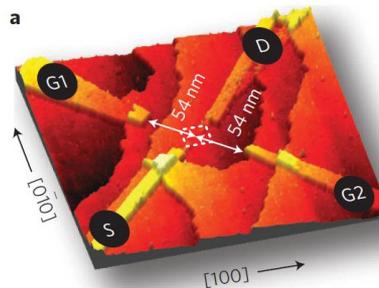
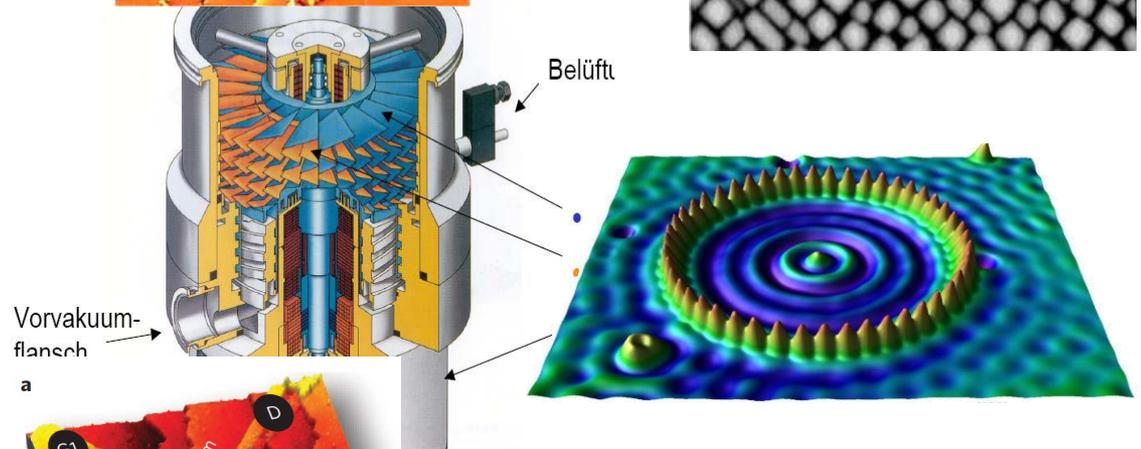
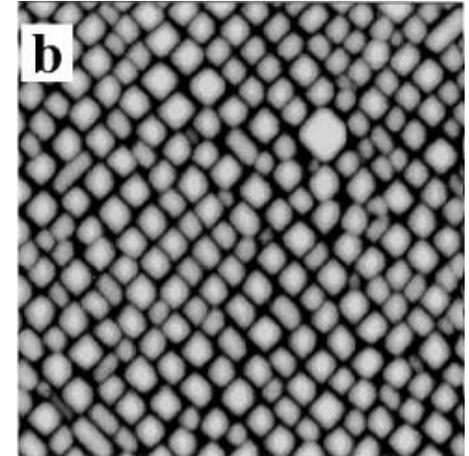
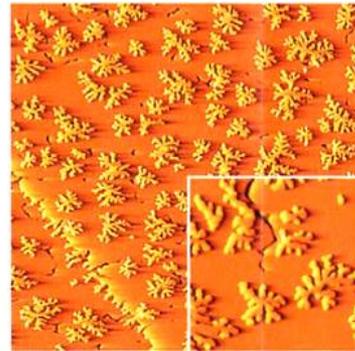
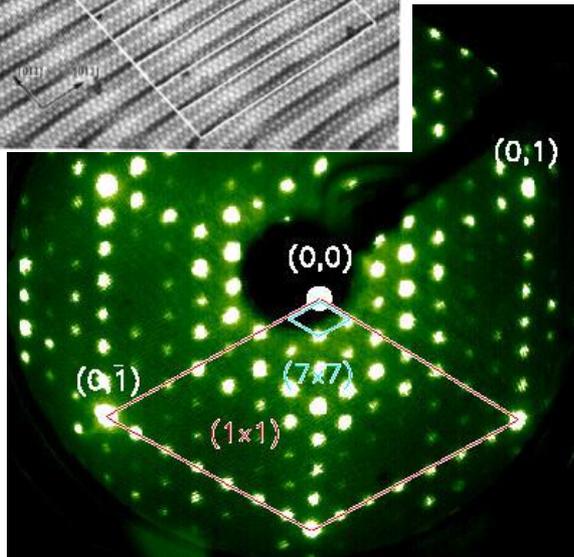
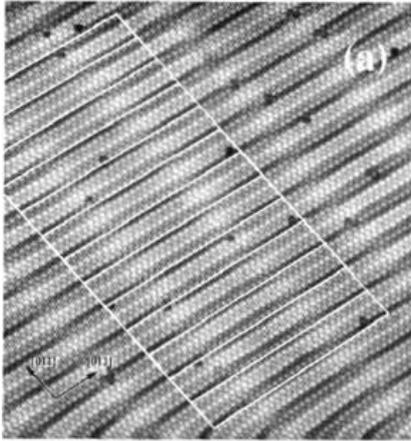


# Oberflächenphysik SS2023

Eine Vorlesung von Philip Willke & Khalil Zakeri-Lori

mit Übungen von Máté Stark



„Oberflächenphysik“

## ECTS, Übungen und Prüfungen

Vorlesung 4 SWS = 8 ECTS, Übung 1 SWS (zweistündig alle 14 Tage) = 2 ECTS

### Vorlesung

Wann: Mo 09:45 - 11:15  
Fr 11:30 - 13:00

Wo: 30.22 Physik-Hörsaal Nr. 3 (Kl. HS A)

### Übung

Wann: Di 14:00 - 15:30, 14-tägig (6 Termine, erster Termin am 2.5.)

Wo: 30.23 Raum 2/17

- Übung erfordert Anwesenheit und Mitrechnen
- Erste Übung in der 3. Vorlesungswoche.
- Aufgaben werden eine Woche vor der Übung auf ILIAS online gestellt.
- Erfolgskontrolle ist das Vorrechnen einer Aufgabe.
- Nötig ist 2 mal Vorrechnen sowie die Teilnahme an der Übung. 2x unentschuldigtes Fehlen führt zum Verlust der ECTS Punkte.
- Übung entspricht 2 ECTS und ist Pflicht, wenn Sie das Modul als Nebenfach (ohne mündliche Prüfung) verwenden wollen.

## ECTS, Übungen und Prüfungen

### **Physikalisches Nebenfach** (ohne Note)

Vorlesung + 20 min. Vortrag (8 ECTS)

Vorlesung + Übung (10 ECTS)

### **Ergänzungsfach** (erfordert Note)

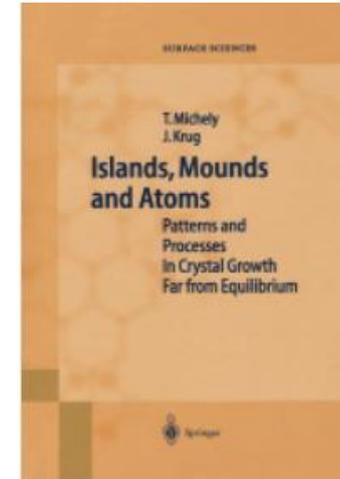
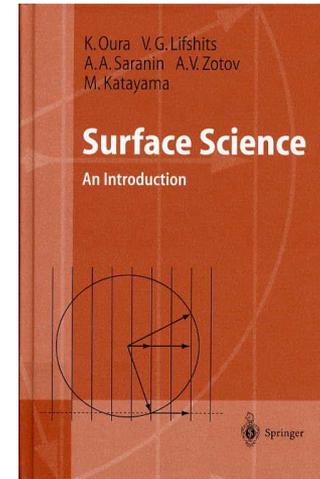
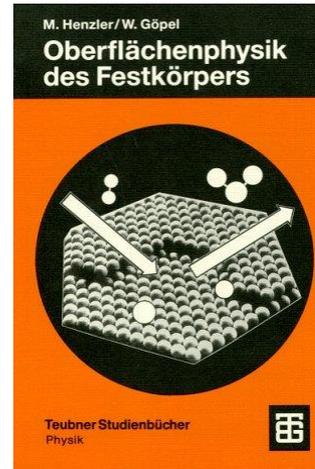
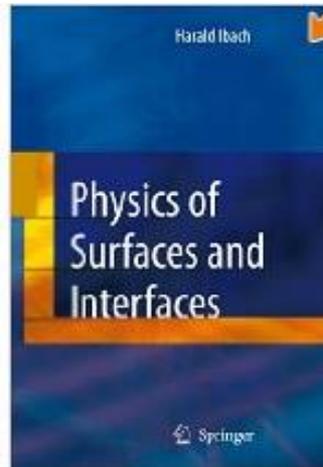
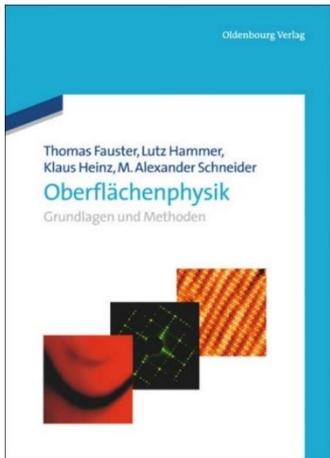
Klassische Prüfung (8/10 ECTS)

### **Schwerpunktfach** (erfordert mündliche Prüfung)

Klassische Prüfung (8/10 ECTS)

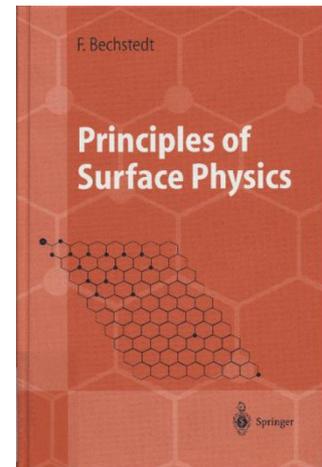
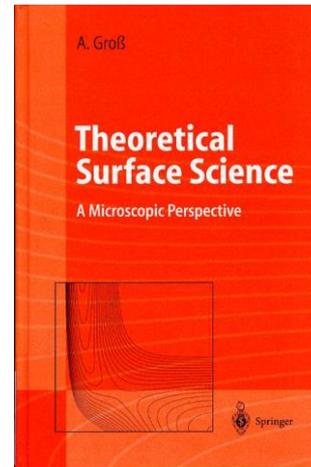
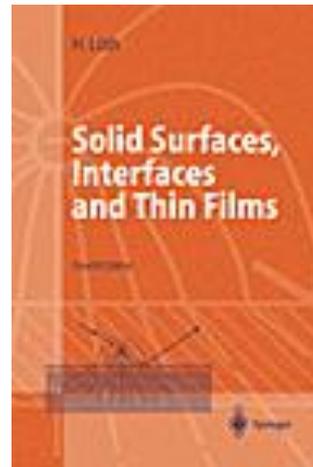
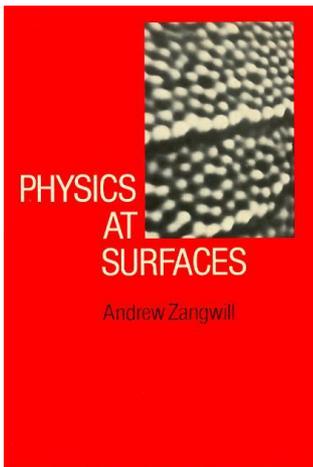
## Main Literature

- (1) **Physics of Surfaces and Interfaces**,  
Harald Ibach (Springer, Berlin 2006)
- (2) **Oberflächenphysik**  
Thomas Fauster (Springer, Berlin 2006)  
<https://www.degruyter.com/document/doi/10.1524/9783486856200/html>
- (3) **Oberflächenphysik des Festkörpers**,  
M. Henzler, W. Göpel, and C. Ziegler (Teubner, 1994)
- (4) **Surface Science**  
K.Oura, V.G. Lifshits, A.A. Saranin, ... (Springer, 2003)
- (5) **Islands, Mounds, and Atoms**  
T. Michely, J. Krug, ... (Springer, 2004)



## Additional Literature

- (1) **Surface and Interfaces of Solid Materials**,  
H. Lüth (Springer, Berlin, 1995)
- (2) **Physics at Surfaces**,  
A. Zangwill (Cambridge University Press, 1988)
- (3) **Modern Techniques of Surface Science**,  
D. Woodruff, T. A. Delchar, and D. P. Woodruff  
(Cambridge University Press, 2002)
- (4) **Concepts in Surface Physics**,  
M.C. Desjonqueres, D. Spanjaard (Springer, Berlin, 1996)



# MODULHANDBUCH

## Empfehlungen

Grundlagenkenntnisse der Festkörperphysik, Quantenmechanik und der Thermodynamik

## Arbeitsaufwand

300 Stunden bestehend aus Präsenzzeiten (75 Stunden), Nachbereitung der Vorlesung inkl. Prüfungsvorbereitung und Vorbereitung der Übungen (225 Stunden).

## Thematik

In der Vorlesung Oberflächenphysik wird die **Festkörperphysik an Oberflächen und Grenzflächen** sowie die **physikalische Chemie an Oberflächen** besprochen. Beginnen mit der **zweidimensionalen Raumgruppe** wird die **Struktur von Oberflächen** besprochen sowie Effekte, die durch die **Symmetriebrechung an Ober- und Grenzflächen** entstehen. Weiterhin wird das **Schichtwachstum** und die **Modifikation des Schichtwachstums mittels verschiedener Techniken** behandelt. Der Hauptteil der Vorlesung beschäftigt sich mit der **elektronischen Struktur von zweidimensionalen Systemen und Nanostrukturen** sowie **den experimentellen Techniken der Oberflächenphysik**.

## Qualifikationsziele

Der Studierende soll in die **Grundbegriffe der Oberflächenphysik eingeführt** werden, die **relevanten theoretischen Konzepte** beherrschen lernen sowie **die Konzepte und Messmethoden der Oberflächenphysik** verstehen und anwenden lernen. In der Übung soll der Studierende **konkrete Probleme der Oberflächenphysik** in Gruppen lösen unter Anwendung des in der Vorlesung vermittelten Faktenwissens.

## Übersicht über die Kapitel der Vorlesung

0. Motivation
1. Die Oberfläche
2. Dünne Gase
3. Methoden der Oberflächenphysik
4. Schichtwachstum
5. Oberflächenchemie
6. Elektronische Struktur von Oberflächen
7. Oberflächenmagnetismus
8. Quantennanowissenschaften auf Oberflächen

# 0. Überblick

## Fahrplan:

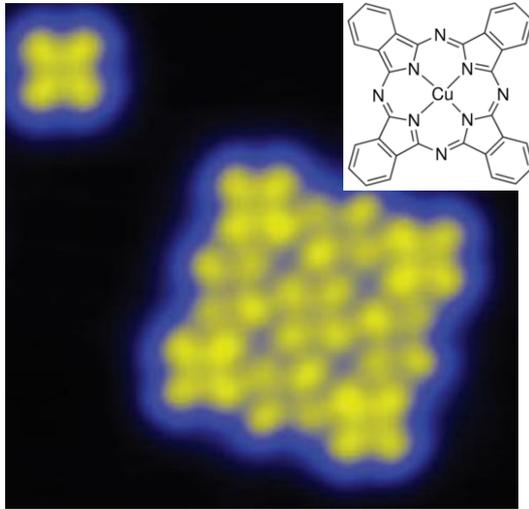
SS2023 - Oberflächenphysik					
#	Day	Date	lecturer		Topic
1	Monday	17.04.2023	PW		1.1 Was ist eine Oberfläche 1.2 Kristalle in 3D 1.3 Tapetengruppe
2	Friday	21.04.2023	PW		1.4 Das reziproke Gitter 1.5 Rekonstruktionen und Überstrukturen 1.6 Technologisch Relevante Oberflächen
3	Monday	24.04.2023	PW		Diamant/Zinkblende/Si111 7x7 1.7 Defekte an Oberflächen
4	Friday	28.04.2023		KZL	2 Dünne Gase 2.1 Adsorption von Gasen 2.2 Das Restgas
x	Monday (Tag der	01.05.2023			
5	Friday	05.05.2023		KZL	2.3 Vakuumpumpen
6	Monday	08.05.2023		KZL	2.4 Druckmessung
7	Friday	12.05.2023		KZL	3 Methoden der Oberflächenphysik 3.1. Kristallpräparation
8	Monday	15.05.2023		KZL	3.2. Chemische Oberflächenanalyse
9	Friday	19.05.2023		KZL	3.3. Beugungsmethoden
10	Monday	22.05.2023	PW		3.4. Frühe Realraumabbildung 3.5. Rastertunnelmikroskopie
11	Friday	26.05.2023	PW		3.6. Rasterkraftmikroskopie
x	Monday (Pfingster	29.05.2023			
x	Friday (Pfingsten)	02.06.2023			
12	Monday	05.06.2023	PW		4. Schichtwachstum 4.1. Homoepitaxie
13	Friday	09.06.2023	PW		4.2. Nukleation
14	Monday	12.06.2023	PW		4.3. Inselformen 4.4. Wachstumsmanipulation
15	Friday	16.06.2023	PW		4.5. Heteroepitaxie
16	Monday	19.06.2023	PW		4.6. Thermische Stabilität von Nanostrukturen
17	Friday	23.06.2023	PW		5 Oberflächenchemie 5.1. Adsorption 5.2. Adsorptionsthermen
18	Monday	26.06.2023	PW		5.3. Desorption 5.4. Katalyse
19	Friday	30.06.2023		KLZ	5.5. Phononen EELS
20	Monday	03.07.2023		KLZ	6 Elektronische Struktur 6.1. Die Bandstruktur von Metallen + Photoemission
21	Friday	07.07.2023		KLZ	6.2. Die Bandstruktur von Halbleitern 6.3. Die Elektronendichte an der Oberfläche
22	Monday	10.07.2023		KLZ	7 Magnetismus 7.1. Magnetokristalline Anisotropie
23	Friday	14.07.2023		KLZ	7.3. Magnetowiderstandseffekte 7.4. Magnonen + MFM
24	Monday	17.07.2023	PW		6.4. Rastertunnelspektroskopie 6.5. Inelastische Tunnelprozesse
25	Friday	21.07.2023	PW		8 Spins on Surfaces
26	Monday	24.07.2023	PW		Wiederholung
27	Friday	28.07.2023	PW	KLZ	Fragen und Labortour

## 0. Motivation

## Warum sollten Sie Oberflächenphysik hören?

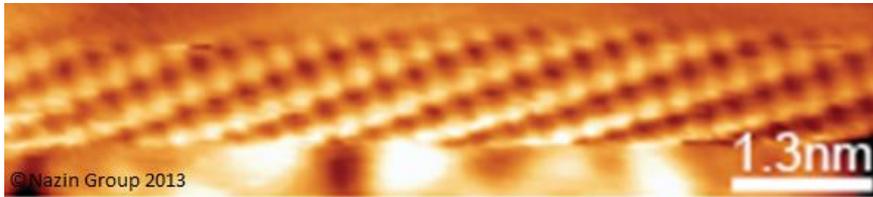
- Alles, was wir sehen, sind Oberflächen
- entscheidende Rolle bei den Eigenschaften, der Funktion und der Leistung fortschrittlicher Materialien und in Nanotechnologien
- stark interdisziplinär, umfasst die Bereiche Physik, Chemie und viele mehr (z.B. Biophysik, Geo-, Atmosphären- und Umweltwissenschaften, Materialwissenschaften und Verfahrenstechnik)
- Elektronische, magnetische und optische Geräte, Sensoren, Katalysatoren, Schmiermittel, Hart- und Wärmedämmschichten, Schutz vor Korrosion und Rissbildung in rauen Umgebungen.
- Sie erlangen sehr sehr praktisches Wissen ganz nebenbei (z.B. Vakuumtechnik, Wachstumstechniken)
- Wunderschön!

## Moleküle



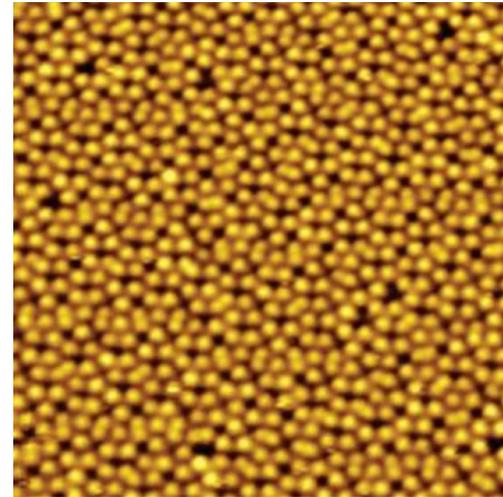
A. Mugarza et al. Nature Comm. 2, (2011)

## Kohlenstoff Nanoröhre



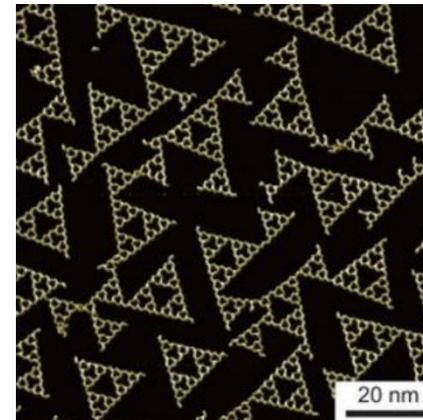
Nazin group, U Oregon

## Quasikristalle



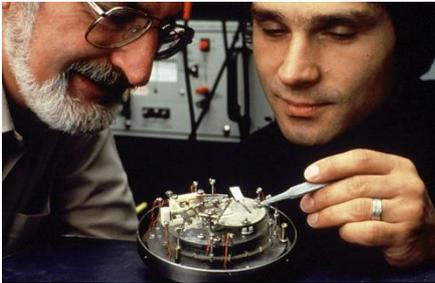
S. Foerster et al.,  
Nature 502, 2013

## Molekulare Sierpinski-Dreiecke

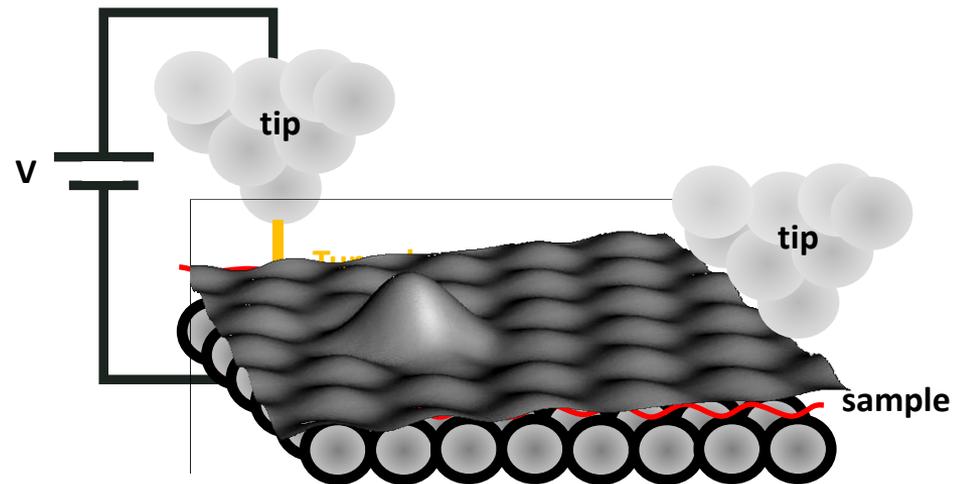
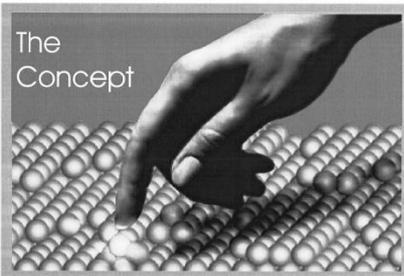


J. Shang et al.,  
Nature Chemistry  
7, (2015)

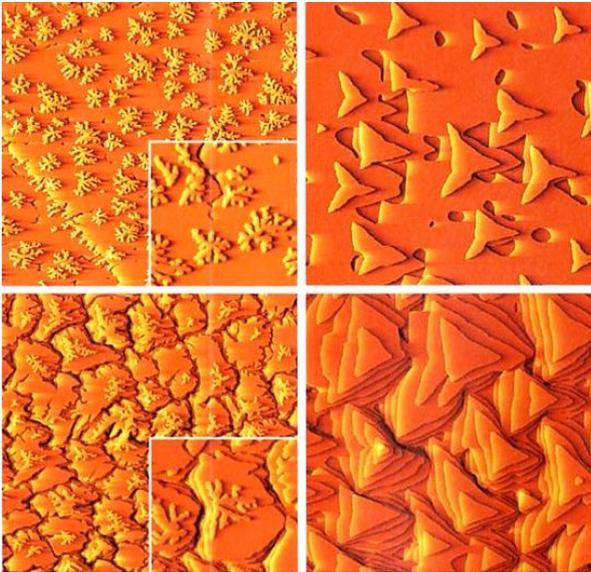
## 3. Methoden der Oberflächenphysik



Heinrich Rohrer, Gerd Binnig  
IBM Zurich ~1981

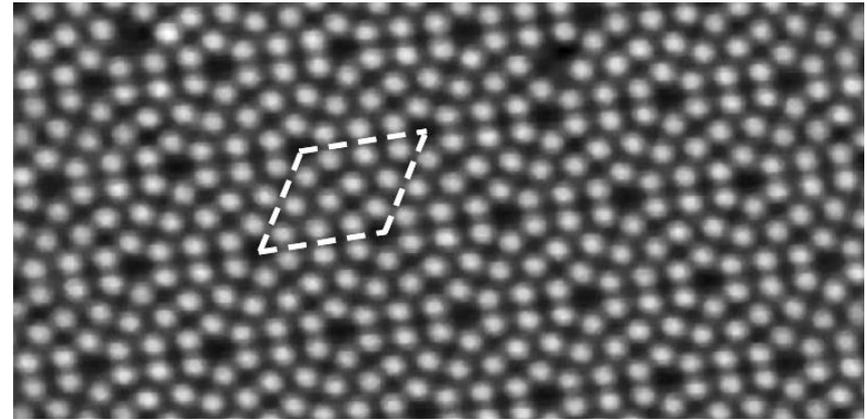


## 4. Schichtwachstum



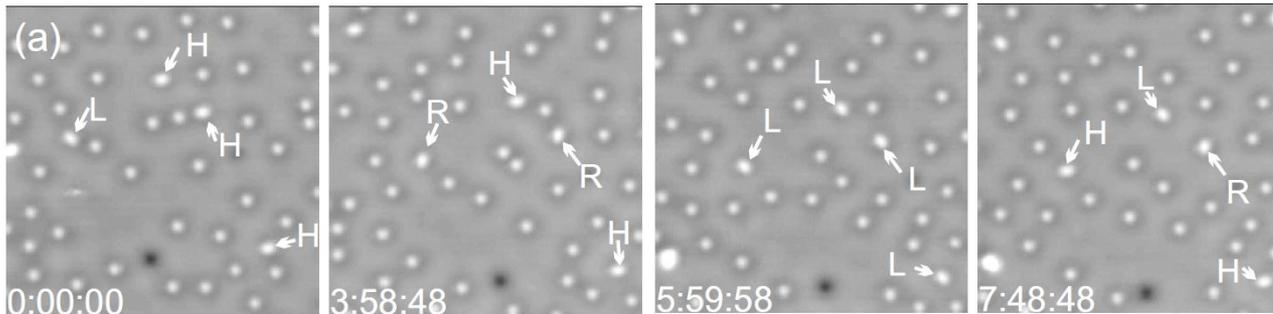
Platin Inseln auf Platin

## 1. Die Oberfläche

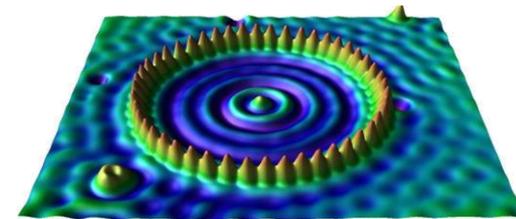


Si(111) Oberfläche

## 8. Quantennanowissenschaften auf Oberflächen



Kupfer Adatome und Addimere auf Ag(111) bei 10 K



Fe Atome in einem Quantenkorral

## Übersicht über Kapitel 1

### 1. Die Oberfläche

#### 1.1 Definitionen

#### 1.2 Kristalle in 3D

#### 1.3 Raumgitter in 2D

#### 1.4 Die Oberflächen-Brillouin Zone

#### 1.5 Überstrukturen

#### 1.6 Technologisch wichtige Oberflächen

#### 1.7 Defekte an Oberflächen

## 1.1 Definitionen

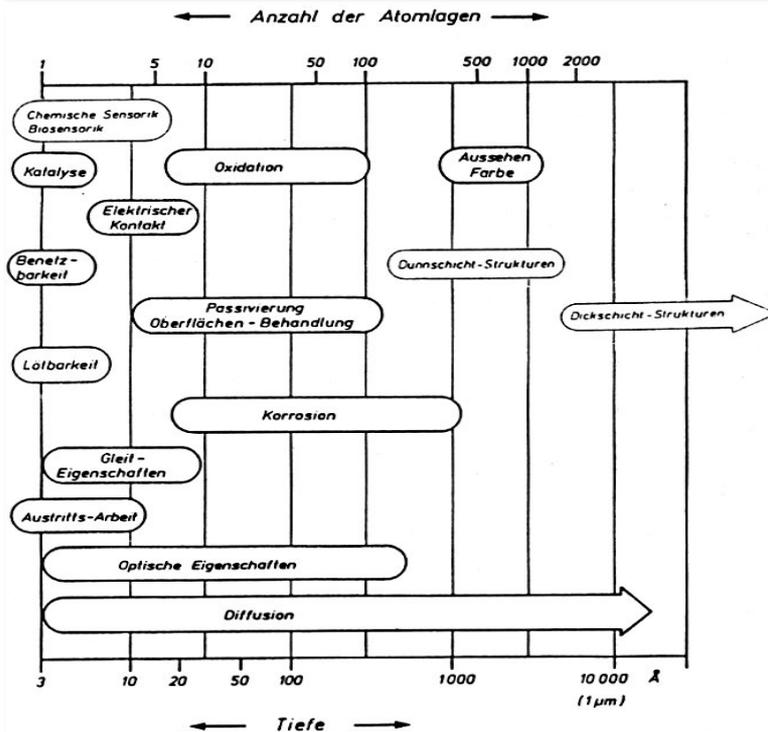
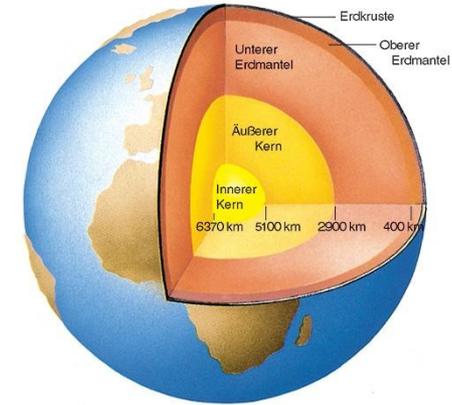
## **Lernziele**

- Was ist eine Oberfläche/ Motivation
- Raumgruppen und ihre Klassifizierung

**Was ist eine Oberfläche?**

# 1.1 Was ist eine Oberfläche

**Henzler:** "Oberflächenphysik ist die Wissenschaft, in der Eigenschaften in der obersten atomaren Schicht und alle damit zusammenhängenden mittelbaren und unmittelbaren Änderungen von Volumeneigenschaften beschrieben werden."



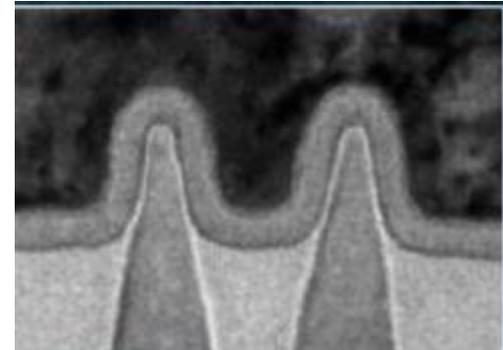
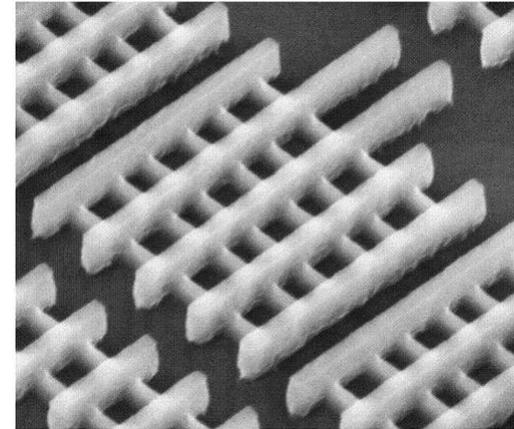
- In 3D Kristallen haben wir  $\sim 10^{23}$  Freiheitsgrade pro  $\sim \text{cm}^2$   
→ reduziert auf eine einfache Basis, die periodisch wiederholt wird
- An der Oberfläche ist diese Periodizität verletzt.  
→ Die Oberfläche hat andere Eigenschaften als das Volumen.  
→ fundamentale Folgen für die Thermodynamik  
→ dramatische Änderungen der Zustandsdichten (DOS, 2DEG)  
→ elektronische Eigenschaften ändern sich wegen der Symmetriebrechung (Austrittsarbeit)  
→ chemische Eigenschaften ändern sich

# 1.1 Was ist eine Oberfläche

## Oberfläche: Zugang + Kontrolle



## FinFET Transistor (INTEL)



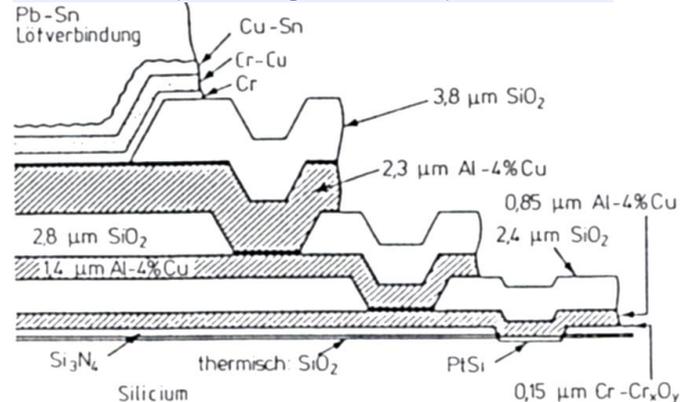
# 1.1 Was ist eine Oberfläche

Zur Oberfläche/Grenzflächenphysik gehören sehr unterschiedliche Phänomene:

- Physikalische Chemie : Katalyse, Korrosion, Oberflächenveredelung, Benetzung etc.
- Physik : Kontaktwiderstand, Reibung, Haftung, pn-Übergänge, optische Eigenschaften, nichtlineare Optik, magnetische Eigenschaften , Austrittsarbeit, etc.
- Auch in Nanostrukturen spielen Oberflächen/Grenzflächeneffekte eine Rolle.

- Beispiele:  
Miniaturisierung  
in der  
Halbleitertechnologie

Bipolares Halbleiterbauelement  
(vor einigen Jahren)

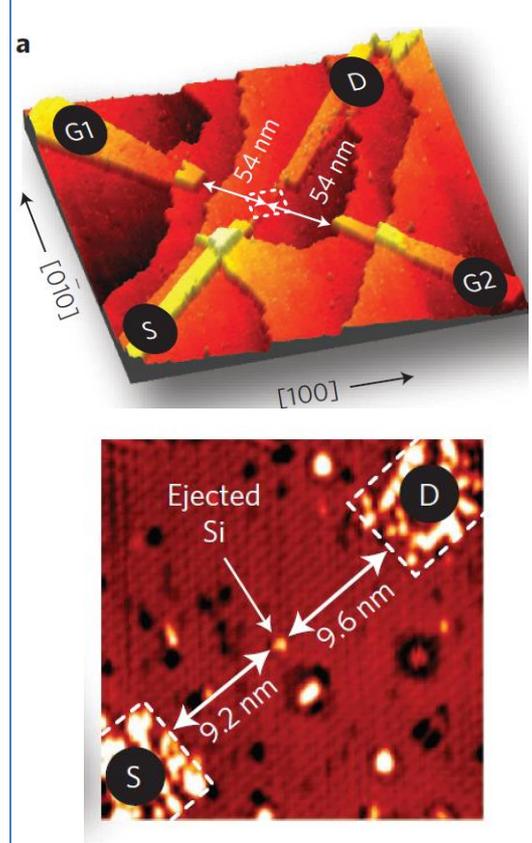
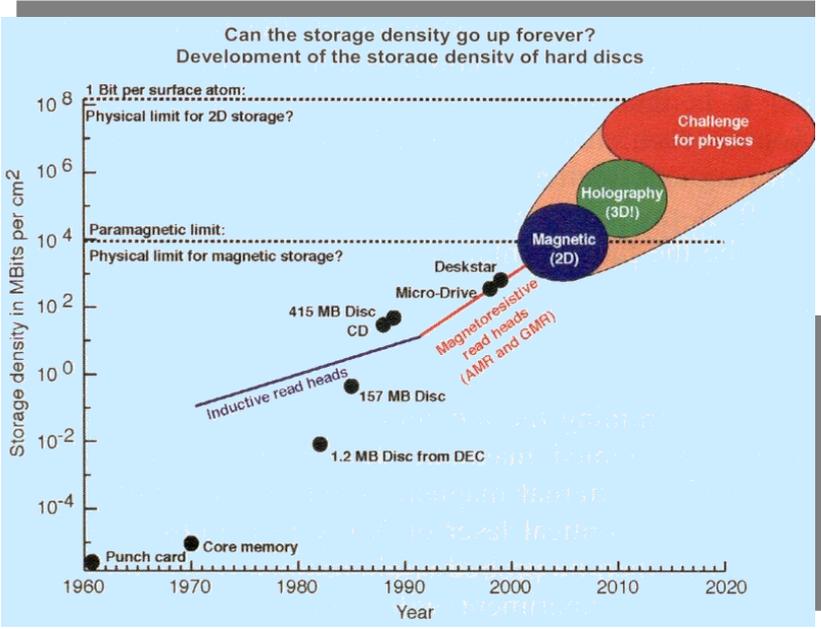


Henzler, S. 23

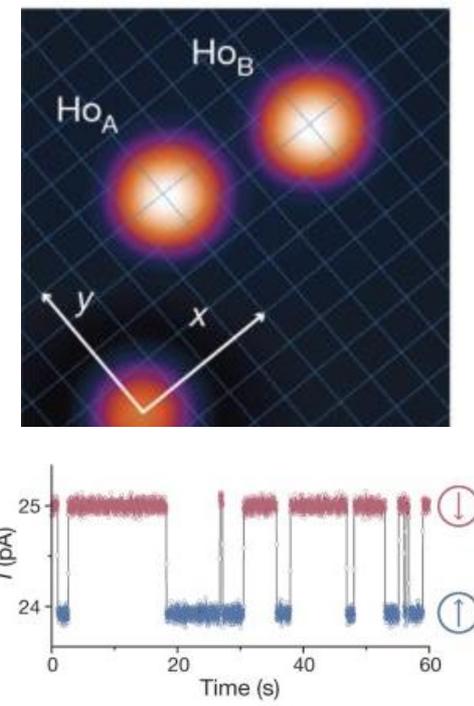
# 1.1 Definition der Oberfläche

## Beispiel: Miniaturisierung Datenspeicher

### Moore's law:



Fuechsle et al., Nature Nano 2012  
<https://www.nature.com/articles/nano.2012.21>



Natterer et al., Nature 2017  
<https://www.nature.com/articles/nature21371>

# 1.1 Was ist eine Oberfläche

## Verhältnis von Oberflächen- zu Volumenatomen

Kantenlänge des Würfels	1 nm	1 $\mu\text{m}$	1 mm
Zahl der Volumenatome $N_b$	1	$2,7 \cdot 10^{10}$	$2,7 \cdot 10^{19}$
Zahl der Oberflächenatome $N_s$	26	$5,4 \cdot 10^7$	$5,4 \cdot 10^{13}$
Anteil der Oberflächenatome $N_s / (N_b + N_s)$	0,96	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-6}$
Zahl der Kantenatome	12	$3,6 \cdot 10^4$	$3,6 \cdot 10^7$
Zahl der Eckenatome	8	8	8

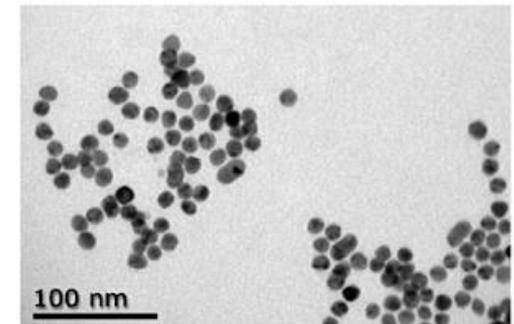
### Beispiel : kubisches Gitter 1/3 vom Atomabstand

1  $\mu\text{m}$   $\rightarrow$  0.2% Oberflächenatome

1nm  $\rightarrow$  96% Oberflächenatome

$\rightarrow$  komplett verschiedene physikalische Eigenschaften!

Gold Nanopartikel



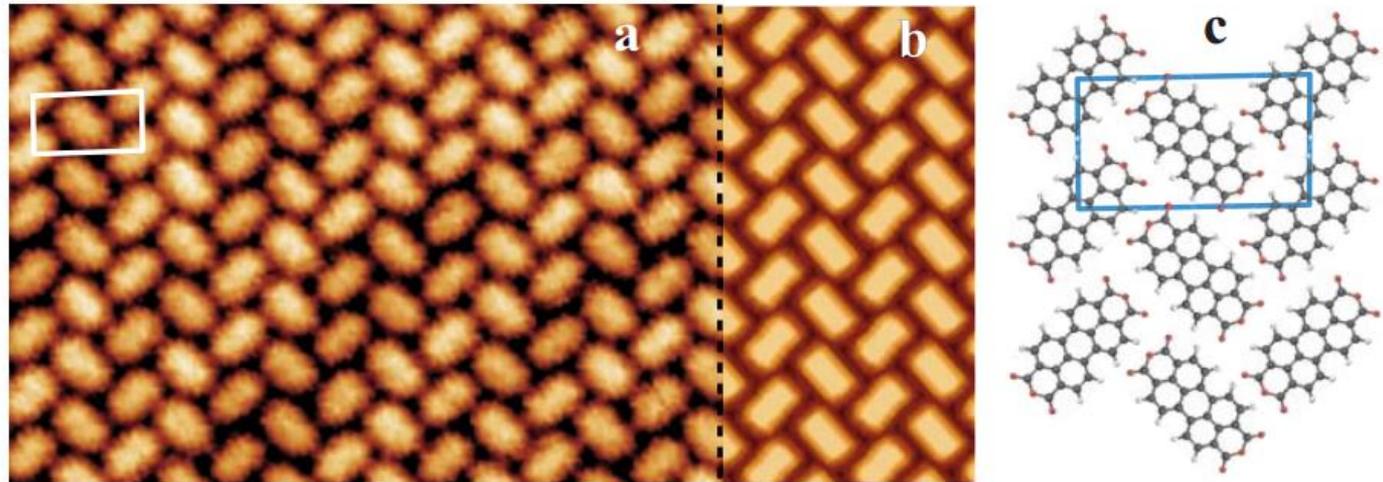
Henzler, S. 19

# 1.1 Was ist eine Oberfläche

- Auf Oberflächen finden Ordnungsphänomene statt – die man sich auch anschauen kann

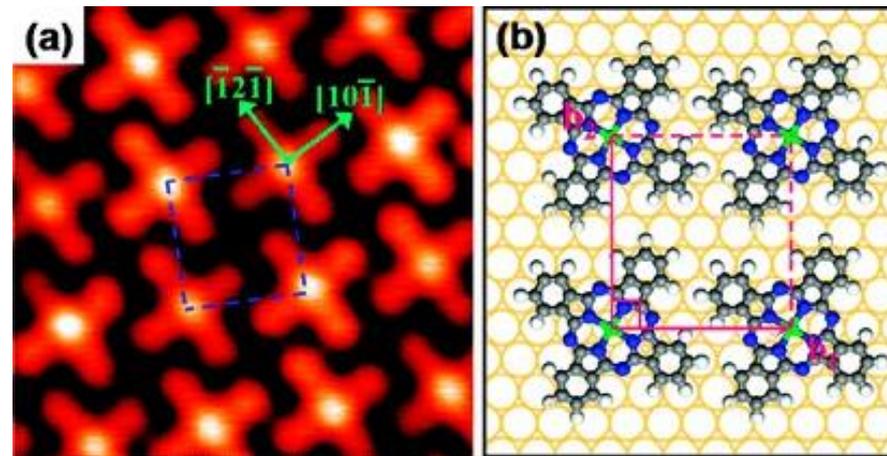
## PTDCA auf Gold

<https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.77.201408>



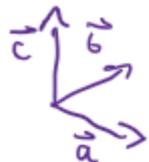
## FePc auf Gold

<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jp070388l>



## 1.2 Kristalle in 3D

# 1.2 Kristalle in 3D



$\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$  Basisvektoren

Kristall ist invariant  
unter Translationen von

$$h \cdot \vec{a} + k \cdot \vec{b} + l \cdot \vec{c} \quad h, k, l \in \mathbb{Z}$$

• In 3D gibt es 14 Bravais Gitter

$$|\vec{a}| = |\vec{b}| = |\vec{c}|$$

$$|\vec{a}| = |\vec{b}| \neq |\vec{c}|$$

$$|\vec{a}| \neq |\vec{b}| \neq |\vec{c}|$$

• rechtwinklig, schiefwinklig

• Unterschiede in der Länge  
von  $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$

• Weitere Unterschiede

(P) primitiv: - Wiederholung der  
Struktur an den  
Eckpunkten

(F) flächenzentriert: " "  
+ Flächenmittelpunkte

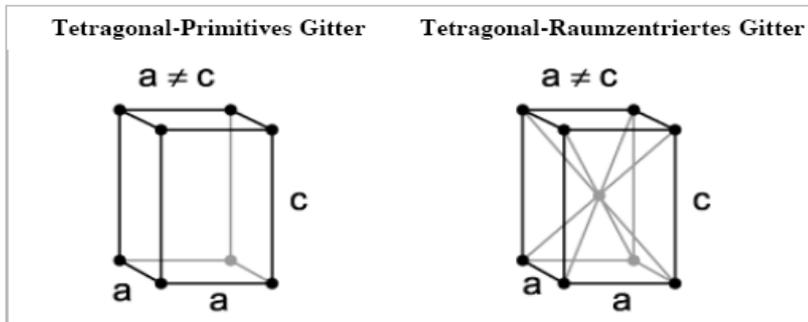
(I) raumzentriert: " "  
+ Raumzentren

## Rechtwinklige Gitter

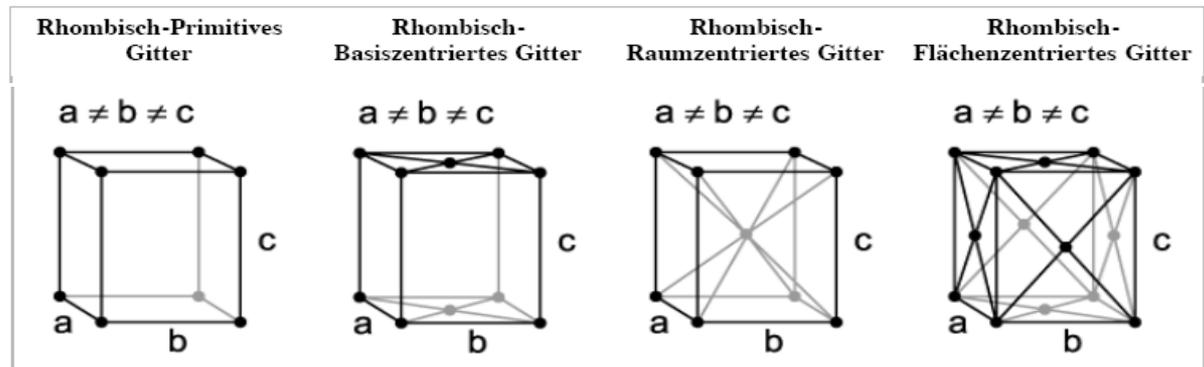
**Kubisch:**



**:Tetragonal**

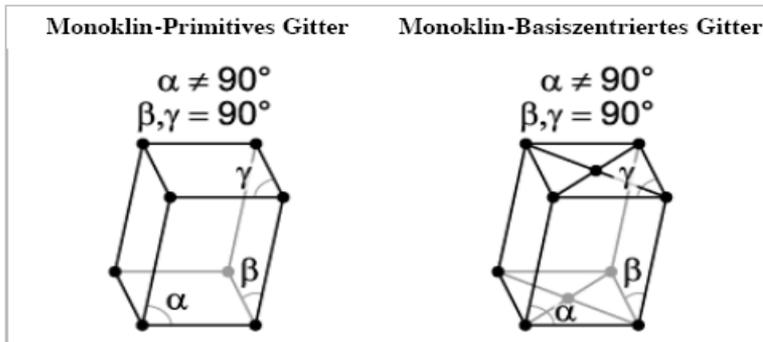
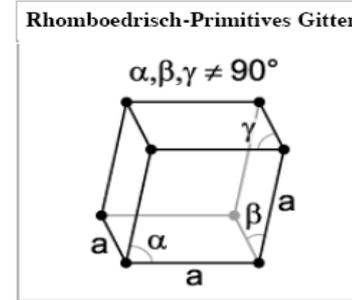
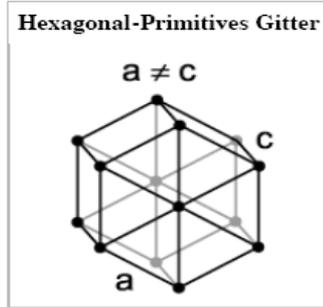


**Rhombisch:**



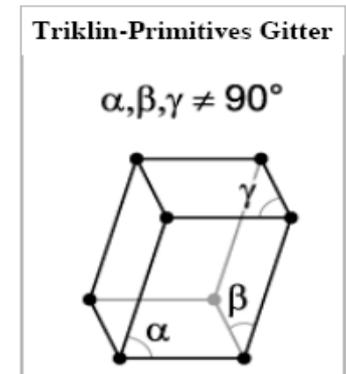
## Schiefwinklige Gitter

Gleichseitig:



:Monoklin

Triklin:



*lattice + basis = crystal structure.*

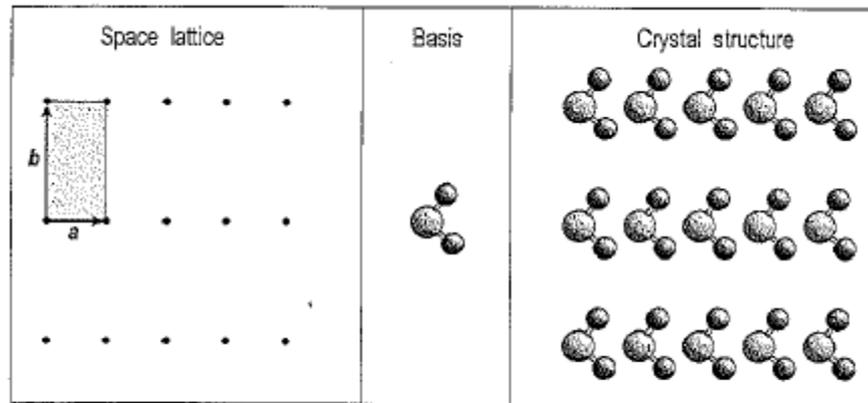


Fig. 2.1. The crystal structure is formed by the addition of the basis to every point of the space lattice

## 1.2 Kristalle in 3D

- Symmetrieeigenschaften der Basis wird durch die Punktgruppe beschrieben. In 3D hat die Punktgruppe 32 Elemente.

### Hermann-Mauguin Notation (HM)

- $n$  : n-fache Rotation (z.B. 2: 180° Rotation) (möglich sind nur 1,2,3,4,5,6)  
 $\bar{n}$  : n-fache Rotation + Inversion  
 $m$  : Spiegelebene  
 $n/m$  : Rotation + Spiegelung senkrecht zur Achse

### Schönfliess Notation

- O: Kubisch                      Oh: Kubisch + Inversion  
T: Tetraedrisch                Th: Tetraedrisch + Inversion

### Drehgruppe

- $C_n$ : n-fache Rotation  
 $C_{nh}$ : n-fache Rotation + Spiegelsym. in Drehachse  
 $C_{nv}$ : n-fache Rotation + Spiegelsym. senkrecht zur Drehachse

# 1.2 Kristalle in 3D

Aus 14 Bravais Gittern und 32 Punktsymmetrien ergeben sich 230 Elemente der Raumgruppe.

Crystal system	Hermann-Mauguin		Shubnikov <sup>[1]</sup>	Schoenflies	Orbifold	Coxeter	Order
	(full)	(short)					
Triclinic	1	1	1	$C_1$	11	$[1]^+$	1
	$\bar{1}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$	$C_i = S_2$	x	$[2^+, 2^+]$	2
Monoclinic	2	2	2	$C_2$	22	$[2]^+$	2
	m	m	m	$C_s = C_1h$	*	[1]	2
	$\frac{2}{m}$	2/m	2 : m	$C_{2h}$	2*	$[2, 2^+]$	4
Orthorhombic	222	222	2 : 2	$D_2 = V$	222	$[2, 2]^+$	4
	mm2	mm2	2 · m	$C_{2v}$	*22	[2]	4
	$\frac{2}{m} \frac{2}{m} \frac{2}{m}$	mmm	m · 2 : m	$D_{2h} = V_h$	*222	[2, 2]	8
Tetragonal	4	4	4	$C_4$	44	$[4]^+$	4
	$\bar{4}$	$\bar{4}$	$\bar{4}$	$S_4$	2x	$[2^+, 4^+]$	4
	$\frac{4}{m}$	4/m	4 : m	$C_{4h}$	4*	$[2, 4^+]$	8
	422	422	4 : 2	$D_4$	422	$[4, 2]^+$	8
	4mm	4mm	4 · m	$C_{4v}$	*44	[4]	8
	$\bar{4}2m$	$\bar{4}2m$	$\bar{4} \cdot m$	$D_{2d} = V_d$	2*2	$[2^+, 4]$	8
Trigonal	$\frac{4}{m} \frac{2}{m} \frac{2}{m}$	4/mmm	m · 4 : m	$D_{4h}$	*422	[4, 2]	16
	3	3	3	$C_3$	33	$[3]^+$	3
	$\bar{3}$	$\bar{3}$	$\bar{6}$	$S_6 = C_{3i}$	3x	$[2^+, 6^+]$	6
	32	32	3 : 2	$D_3$	322	$[3, 2]^+$	6
	3m	3m	3 · m	$C_{3v}$	*33	[3]	6
Hexagonal	$\bar{3} \frac{2}{m}$	$\bar{3}m$	$\bar{6} \cdot m$	$D_{3d}$	2*3	$[2^+, 6]$	12
	6	6	6	$C_6$	66	$[6]^+$	6
	$\bar{6}$	$\bar{6}$	3 : m	$C_{3h}$	3*	$[2, 3^+]$	6
	$\frac{6}{m}$	6/m	6 : m	$C_{6h}$	6*	$[2, 6^+]$	12
	622	622	6 : 2	$D_6$	622	$[6, 2]^+$	12
	6mm	6mm	6 · m	$C_{6v}$	*66	[6]	12
Isometric	$\bar{6}m2$	$\bar{6}m2$	m · 3 : m	$D_{3h}$	*322	[3, 2]	12
	$\frac{6}{m} \frac{2}{m} \frac{2}{m}$	6/mmm	m · 6 : m	$D_{6h}$	*622	[6, 2]	24
	23	23	3/2	T	332	$[3, 3]^+$	12
	$\frac{2}{m} \bar{3}$	m $\bar{3}$	$\bar{6}/2$	$T_h$	3*2	$[3^+, 4]$	24
	432	432	3/4	O	432	$[4, 3]^+$	24
Isometric	43m	43m	3/ $\bar{4}$	$T_d$	*332	[3, 3]	24
	$\frac{4}{m} \bar{3} \frac{2}{m}$	m $\bar{3}m$	$\bar{6}/4$	$O_h$	*432	[4, 3]	48

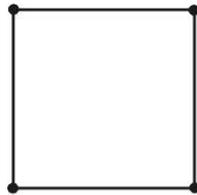
<https://de.wikipedia.org/wiki/Hermann-Mauguin-Symbolik>

## 1.3 Raumgitter in 2D

## 5 Grundgitter

- In 2D haben wir nur 5 Grundgitter (Bravais Gitter) und 17 Elemente der Raumgruppe
- Klassifizierung erlaubt die Eigenwerte der elektronischen Quantenzustände und die Auswahlregeln in spektroskopischen Methoden.
- Schönflies: Punktsymmetrie von Gitterplätzen
- HM: Klassifizierung von Raumgruppen

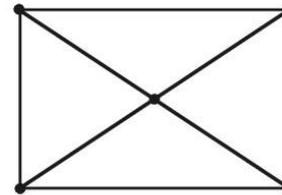
Quadratisches Gitter



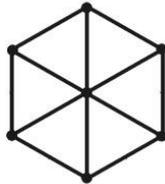
Rechteckig-primitives Gitter



Rhombisches Gitter



Hexagonales Gitter



Parallelogramm Gitter



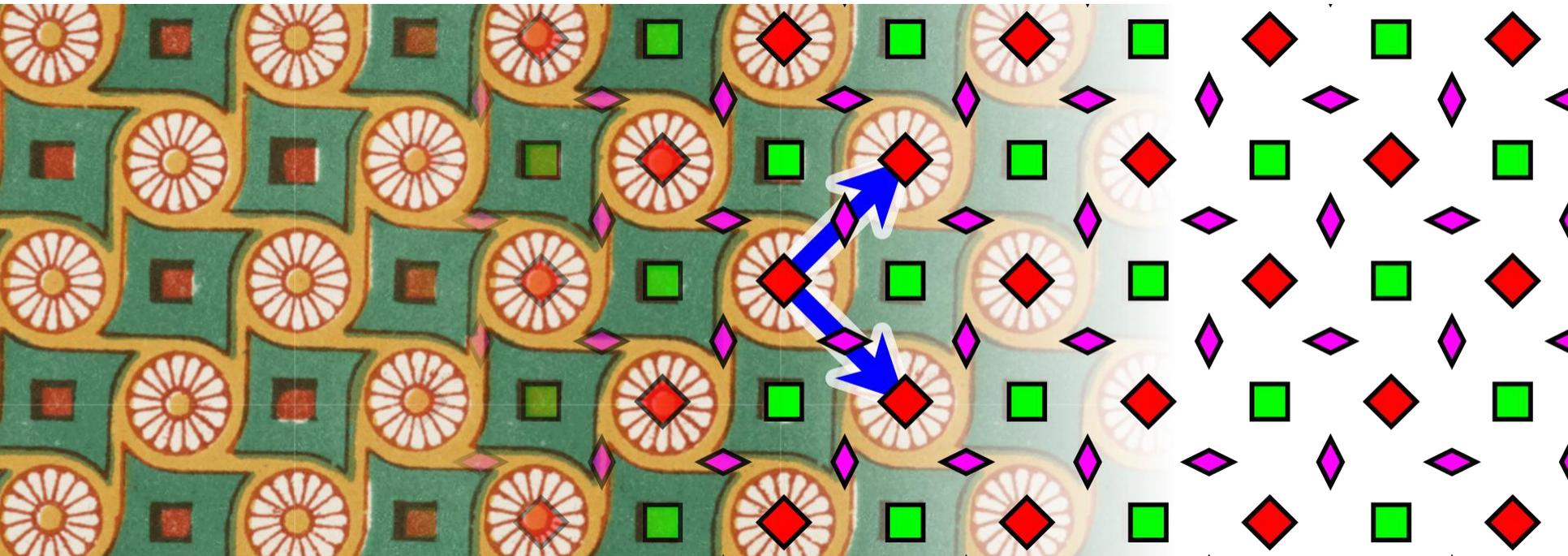
# 1.3 Raumgitter in 2 Dimensionen



<https://www.youtube.com/watch?v=5UbMFiK3LY0&list=RDCMUctS9FTFNInqTMvcFpdyap7w&index=12>

## Tapetengruppen

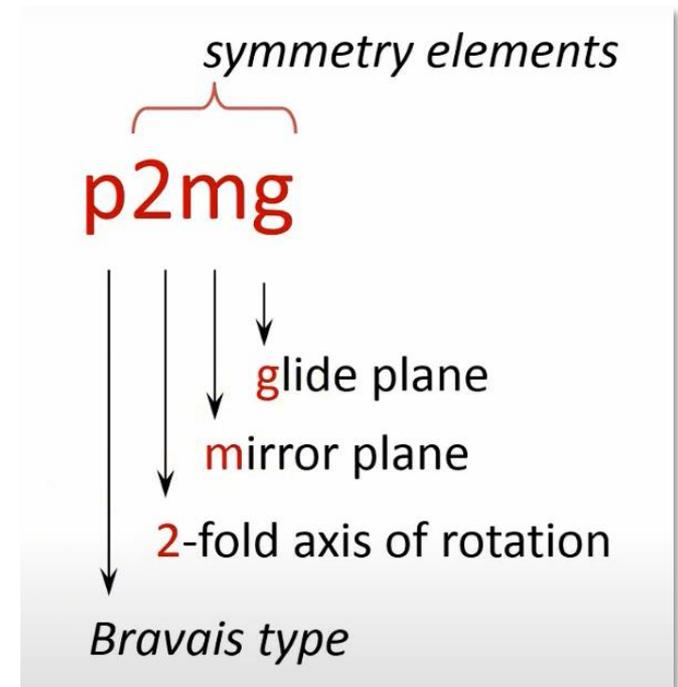
p4



[https://de.wikipedia.org/wiki/Ebene\\_kristallographische\\_Gruppe](https://de.wikipedia.org/wiki/Ebene_kristallographische_Gruppe)

## Notation der Tapetengruppe

- In „Full Notation“ hat dies immer 4 Symbole
- Erstes Symbol: primitive (p) oder zentrierte (c) Struktur
- Zweites Symbol: maximale Ordnung  $n$  der Rotationssymmetrie ( $n = 1, 2, 3, 4, 6$ ).
- 3+4: Symmetrien entlang der  $x$ - und  $y$ -Achse (m = Spiegelebene, g = Gleitspiegelebene, 1 = keine Symmetrie)



## 1.3 Raumgitter in 2 Dimensionen

### Kurzschreibweise:

- Sind beide Symbole 1, so werden sie weggelassen (z. B. p211 = p2).
- Wenn aus den anderen Notationen schon klar wird, um welche Symmetrie es sich handelt

### Full

p111  
p1m1  
p1g1  
c1m1  
p211  
p2mm  
p2mg  
p2gg  
c2mm  
p311  
p3m1  
p31m  
p411  
p4mm  
p4gm  
p611  
p6mm

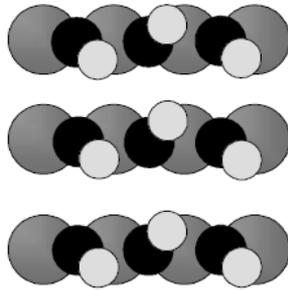
### Short

p1  
pm  
pg  
cm  
p2  
pmm  
pmg  
pgg  
cmm  
p3  
p3m1  
p31m  
p4  
p4m  
p4g  
p6  
p6m

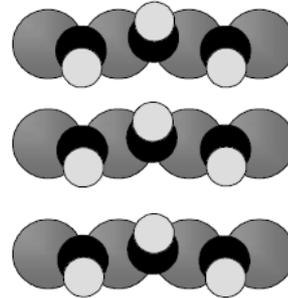
# 1.3 Raumgitter in 2 Dimensionen

## Beispiele

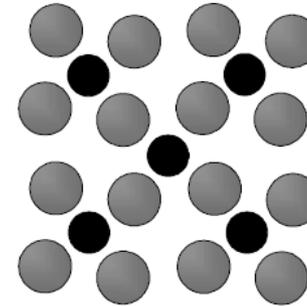
p1g1



p2mg



p4g



p6m



p1



p4m



cmm



# 1.3 Raumgitter in 2 Dimensionen

## HM-Notation

p: primitive

c: centered

m: Spiegelung

g: Gleitspiegelung

Tabelle A.1: Bestimmung der Ebenengruppe einer Oberflächenstruktur.

Maximale Ordnung $n$ der Drehachsen	Spiegelebene?		
	Ja		Nein
$n = 6$	$p6mm$		$p6$
$n = 4$	Weitere Spiegelebene unter $45^\circ$ ?		
	Ja: $p4mm$		Nein: $p4mg$
$n = 3$	Drehachsen, die nicht auf Spiegelebenen liegen?		
	Ja: $p31m$		Nein: $p3m1$
$n = 2$	Spiegelebenen, die senkrecht aufeinander stehen?		Gleitspiegelebenen?
	Drehachse nicht in Spiegelebene?		Nein: $p2mg$
	Ja: $c2mm$		Nein: $p2mm$
$n = 1$	Gleitspiegelebenen zwischen Spiegelebenen?		
	Ja: $c1m1$		Nein: $p1m1$
			Ja: $p1g1$   Nein: $p1$

# 1.3 Raumgitter in 2 Dimensionen

## Übung 1:



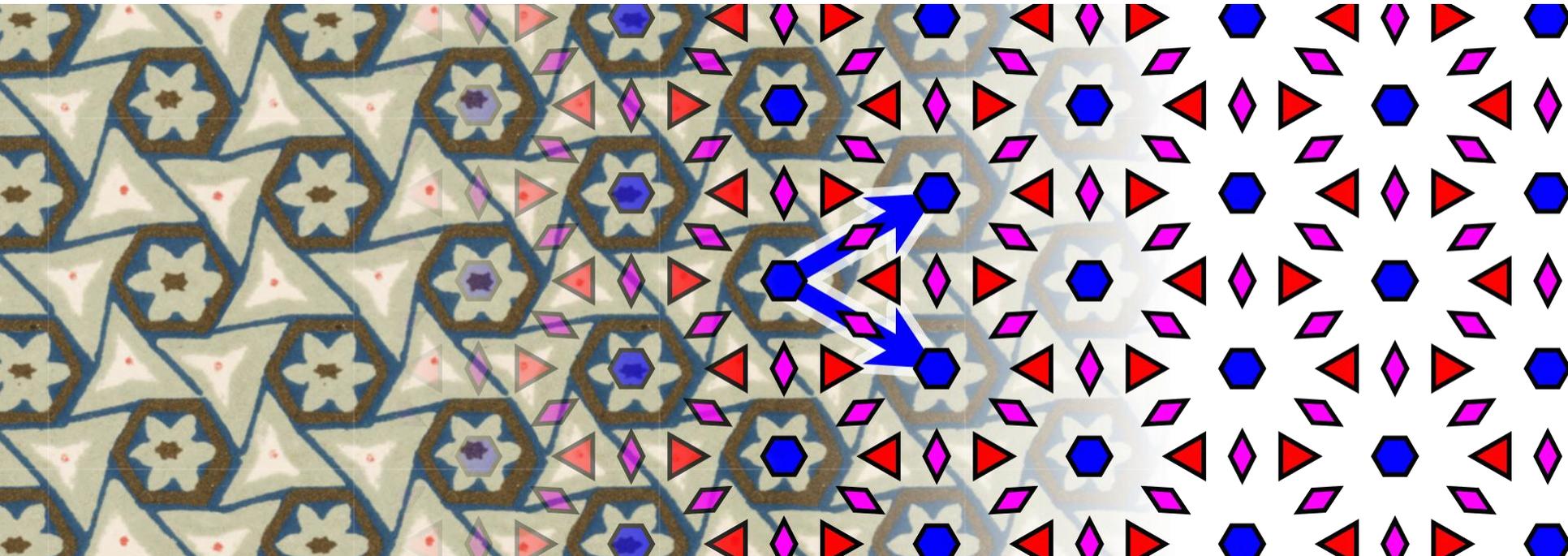
Tabelle A.1: Bestimmung der Ebenengruppe einer Oberflächenstruktur.

Maximale Ordnung $n$ der Drehachsen	Spiegelebene?			
	Ja		Nein	
$n = 6$	$p6mm$		$p6$	
$n = 4$	Weitere Spiegelebene unter $45^\circ$ ?		$p4$	
	Ja: $p4mm$	Nein: $p4mg$		
$n = 3$	Drehachsen, die nicht auf Spiegelebenen liegen?		$p3$	
	Ja: $p31m$	Nein: $p3m1$		
$n = 2$	Spiegelebenen, die senkrecht aufeinander stehen?		Gleitspiegelebenen?	
	Drehachse nicht in Spiegelebene?			Ja: $p2gg$   Nein: $p2$
	Ja: $c2mm$	Nein: $p2mm$		
$n = 1$	Gleitspiegelebenen zwischen Spiegelebenen?		Gleitspiegelebenen?	
	Ja: $c1m1$	Nein: $p1m1$		Ja: $p1g1$   Nein: $p1$

# 1.3 Raumgitter in 2 Dimensionen

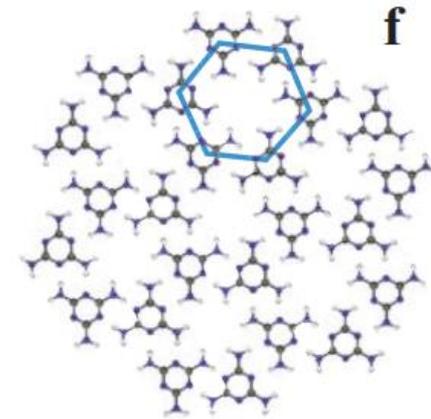
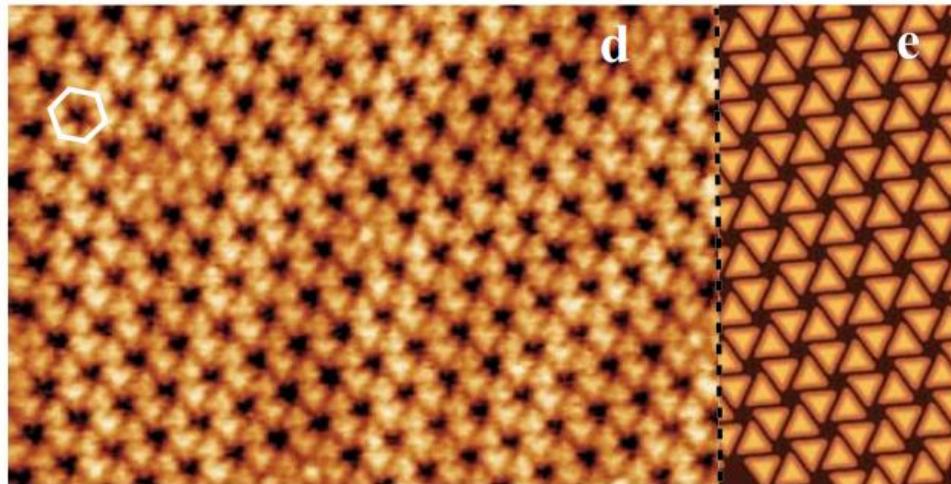
## Übung 1:

p6



## Melamin auf Gold

<https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.77.201408>



## Übung 2:



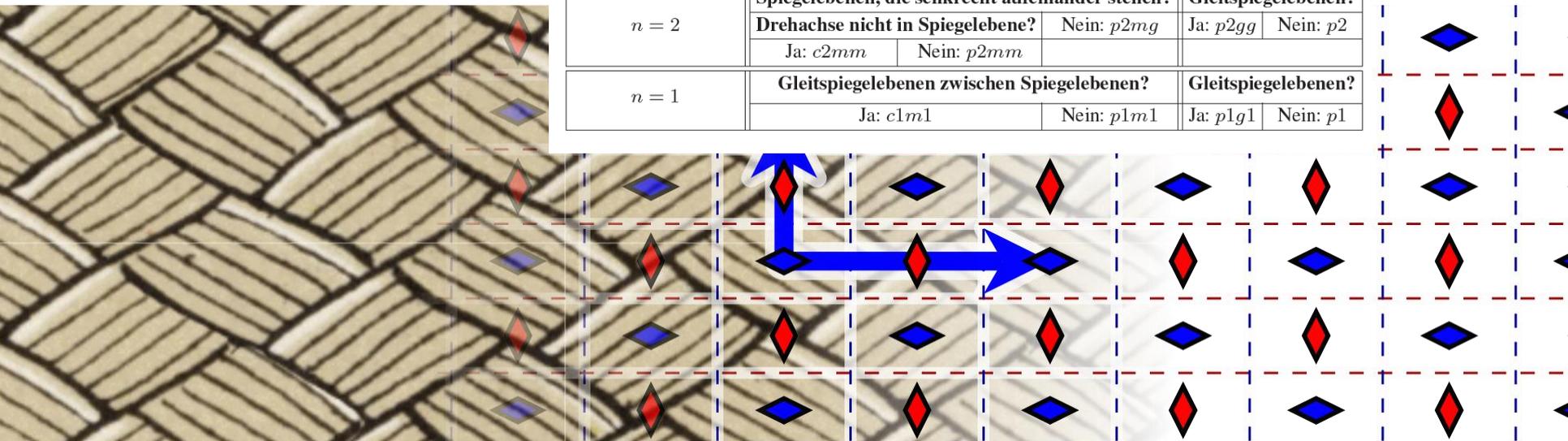
Table A.1: Bestimmung der Ebenengruppe einer Oberflächenstruktur.

Maximale Ordnung $n$ der Drehachsen	Spiegelebene?			
	Ja		Nein	
$n = 6$	$p6mm$		$p6$	
$n = 4$	Weitere Spiegelebene unter $45^\circ$ ?			$p4$
	Ja: $p4mm$		Nein: $p4mg$	
$n = 3$	Drehachsen, die nicht auf Spiegelebenen liegen?			$p3$
	Ja: $p31m$		Nein: $p3m1$	
$n = 2$	Spiegelebenen, die senkrecht aufeinander stehen?		Gleitspiegelebenen?	
	Drehachse nicht in Spiegelebene?		Nein: $p2mg$	Ja: $p2gg$   Nein: $p2$
	Ja: $c2mm$	Nein: $p2mm$		
$n = 1$	Gleitspiegelebenen zwischen Spiegelebenen?			Gleitspiegelebenen?
	Ja: $c1m1$		Nein: $p1m1$	Ja: $p1g1$   Nein: $p1$

# 1.3 Raumgitter in 2 Dimensionen

Tabelle A.1: Bestimmung der Ebenengruppe einer Oberflächenstruktur.

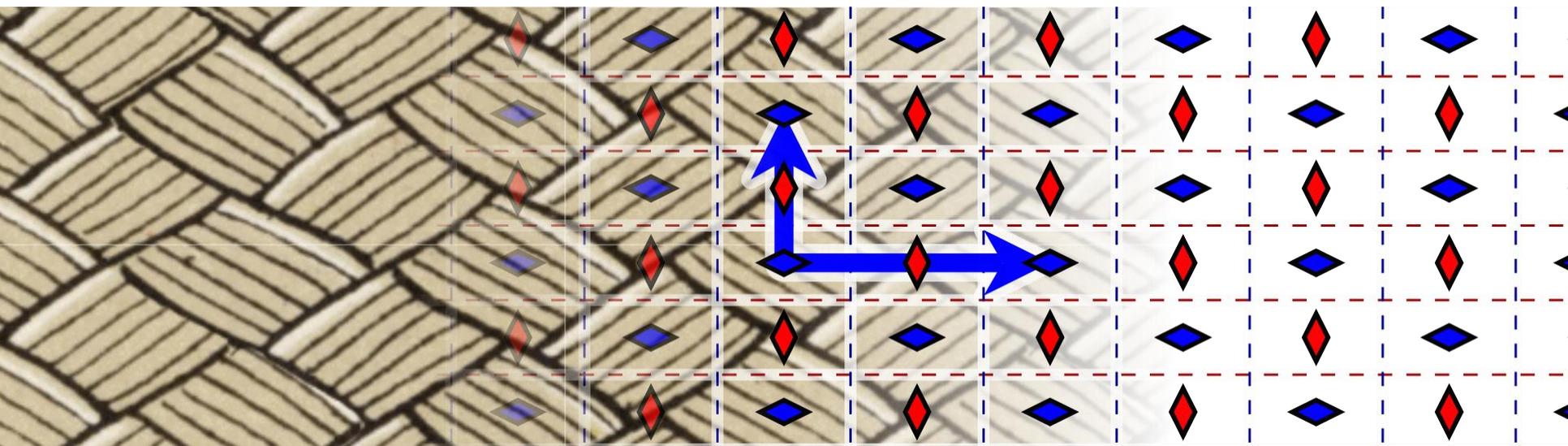
Maximale Ordnung $n$ der Drehachsen	Spiegelebene?			
	Ja		Nein	
$n = 6$	$p6mm$		$p6$	
$n = 4$	Weitere Spiegelebene unter $45^\circ$ ?			
	Ja: $p4mm$		Nein: $p4mg$	
$n = 3$	Drehachsen, die nicht auf Spiegelebenen liegen?			$p3$
	Ja: $p31m$		Nein: $p3m1$	
$n = 2$	Spiegelebenen, die senkrecht aufeinander stehen?			Gleitspiegelebenen?
	Drehachse nicht in Spiegelebene?		Nein: $p2mg$	Ja: $p2gg$   Nein: $p2$
$n = 1$	Gleitspiegelebenen zwischen Spiegelebenen?			Gleitspiegelebenen?
	Ja: $c1m1$		Nein: $p1m1$	Ja: $p1g1$   Nein: $p1$



# 1.3 Raumgitter in 2 Dimensionen

## Übung 2:

pgg

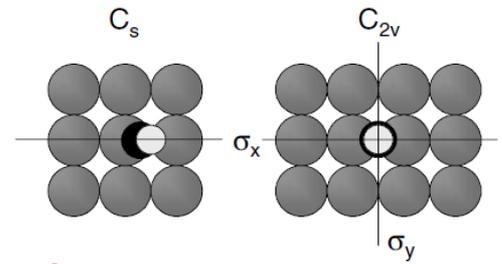


# 1.3 Raumgitter in 2 Dimensionen

- Auch **Schönflies Notation** ist einfacher:

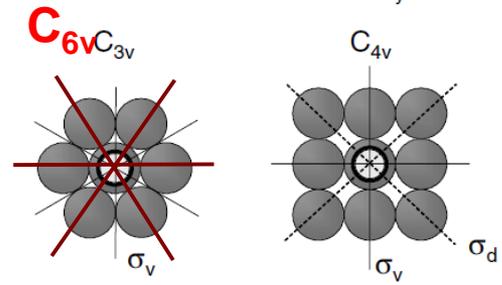
$C_s, C_v, C_2, C_{2v}, C_3, C_{3v}, C_4, C_{4v}, C_6, C_{6v}$  (v: Vertikale Spiegelung)

Keine Rotationssymmetrie  
 $1m$



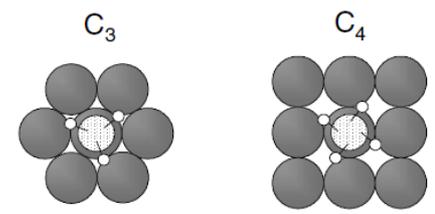
2-zählig + Spiegelsymmetrie  
 $2m$

6-zählig + Spiegelsymmetrie  
 $6m$



4-zählig + Spiegelsymmetrie  
 $4m$

3-zählige Rotationssymmetrie  
ohne Spiegelsymmetrie  
 $3$



4-zählige Rotationssymmetrie  
ohne Spiegelsymmetrie  
 $4$

## Was ist eine Oberfläche

- Henzler/Göpel S. 17 - 34

## Raumgruppen in 3D:

- [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_space\\_groups#list](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_space_groups#list)
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Hermann-Mauguin-Symbolik>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Schoenflies-Symbolik>
- <https://www.youtube.com/watch?v=NaRjGfq19GE>
- E.g. Pmm2: <https://www.youtube.com/watch?v=qDGDU9S36RU>

## Tapetengruppe :

- Ibach S. 5 – 12
- Fauster, Anhang 2
- [https://de.wikipedia.org/wiki/Ebene\\_kristallographische\\_Gruppe](https://de.wikipedia.org/wiki/Ebene_kristallographische_Gruppe)
- [https://www.youtube.com/watch?v=5UbMFiK3LY0&list=RDCMUctS9FTFNI\\_nqTMvcFpdyap7w&index=12](https://www.youtube.com/watch?v=5UbMFiK3LY0&list=RDCMUctS9FTFNI_nqTMvcFpdyap7w&index=12)