

# Einführung in die Geochemie

## Themenübersicht

1. Elemente, Atome, chemische Bindungen
2. Nukleosynthese; Erde, Sonne, Mond
3. Chemisches Gleichgewicht
4. Wässrige Lösungen, Löslichkeit, Flüssigkeitseinschlüsse
5. Redoxpotential, Eh-pH-Diagramme
6. Kinetik geowissenschaftlicher Prozesse  $\pm$  Thermodynamik
7. Geochemische Einteilung der Elemente
8. Spurenelemente, Kristallisation und Schmelzbildung
9. Geochemische Diagramme, Mischungsmodelle
10. Radioaktiver Zerfall
11. Isotopengeochemie
12. Radiometrische Datierung

# Literatur

Faure, G. (1991) Principles and applications of inorganic geochemistry. Maxwell Macmillan, 600 pp.

Gill, R.O. (2015) Chemical fundamentals of geology and environmental geoscience. Wiley-Blackwell, 288 pp.

Rollinson, H.R. (1993): Using geochemical data - evaluation, presentation, interpretation. Longman, 352 pp.

White, W.M. (2013): Geochemistry. Wiley-Blackwell, 660 pp.

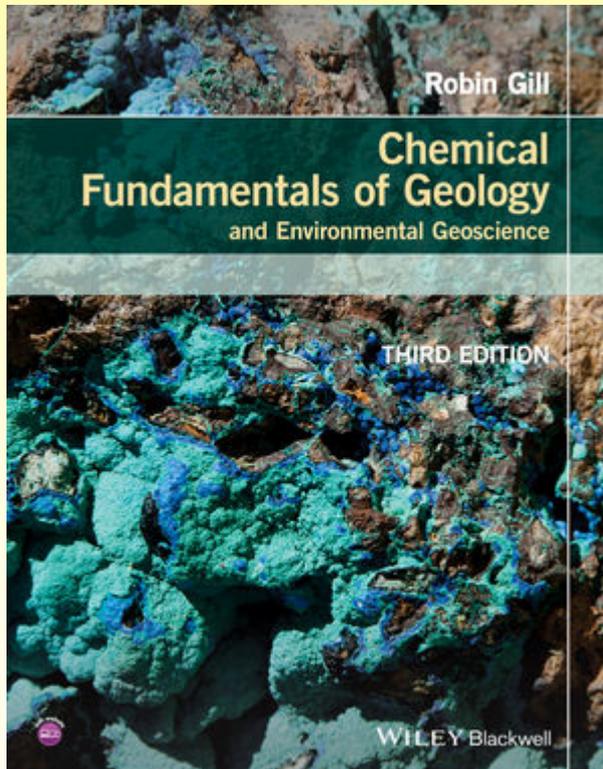
Treatise on Geochemistry (2003, 2014) 15 Bände

<http://www.sciencedirect.com/science/referenceworks/9780080983004>

# Literatur

2015 (in Bibliothek)

Gill, R. (1993) Chemische Grundlagen der Geowissenschaften, Enke, 294 pp. (auf deutsch vergriffen)



## Literatur (deutschsprachig)

Stosch HG.: Einführung in die Isotopengeochemie. Online Text  
Uni Karlsruhe

Möller, P. (1986) Anorganische Geochemie

Allg. Lehrbücher mit Kapitel zur Geochemie:

Markl, G. (2008) Minerale und Gesteine: Mineralogie - Petrologie  
– Geochemie

Okrusch & Matthes (2013) Mineralogie: Eine Einführung in die  
spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde

# Geologie + Chemie = Geochemie

- **Chemie**
  - Verständnis von Stoff- und Energieumwandlung
- **Geologie**
  - Verständnis von der Entstehung und Entwicklung der Erde (und anderer Planeten)
- **Geochemie**
  - Einsatz chemischer Hilfsmittel und Techniken, die dazu dienen:
    - Erdgeschichte zu entschlüsseln
    - Gegenwärtige Prozesse besser zu verstehen
    - Voraussagen über zukünftige Ereignisse zu machen
- *Viele Erd-Prozesse sind chemischer Natur*  
→ **chemisches Grundverständnis erforderlich**

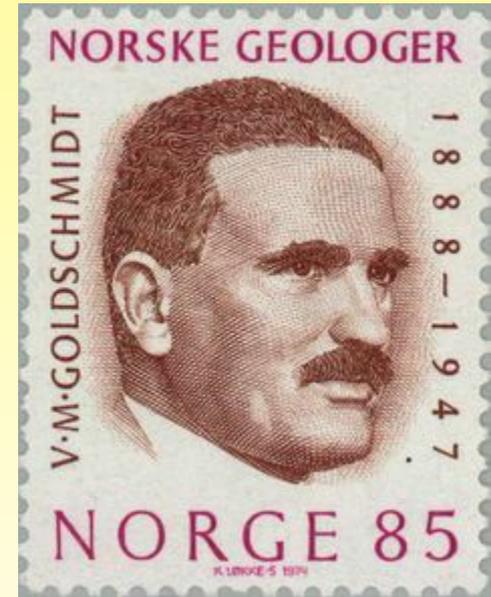
# Begründer der Geochemie



Wladimir  
Wernadski  
(1863-1945)



Alexander  
Fersmann  
(1883-1945)

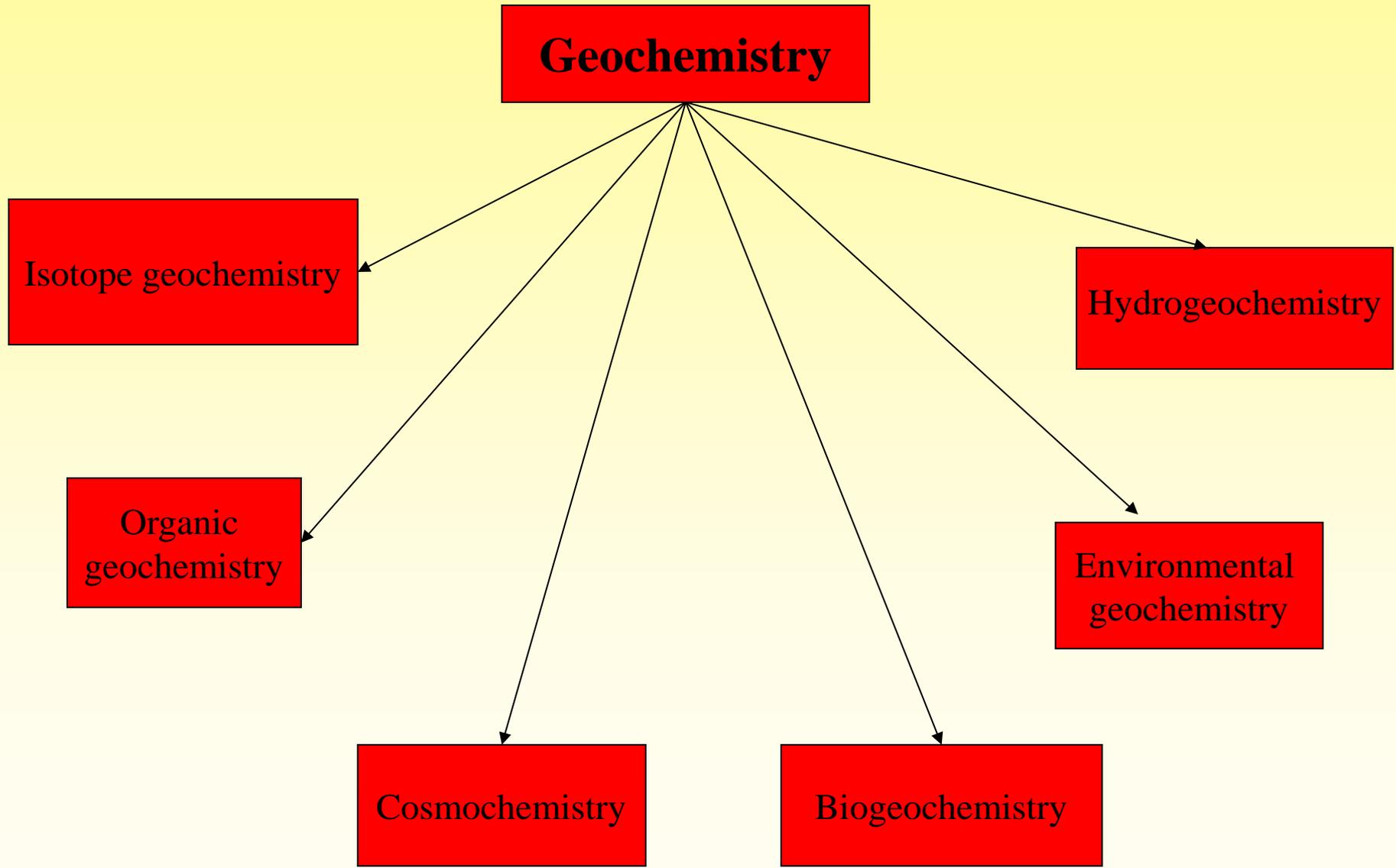


Victor Moritz  
Goldschmidt  
(1888-1947)

# Fragestellungen und Zielsetzungen

- Ergründung der Häufigkeit und Verteilung der chemischen Elemente und ihrer Isotope auf der Erde und im Sonnensystem
- Frage nach den Gründen der Zusammensetzung
- Welche chemischen Reaktionen finden auf der Erdoberfläche und im Erdinneren statt?
- Verteilung der Elemente zwischen den einzelnen geochemischen Reservoir/Systemen. Wie hat diese Verteilung in der Vergangenheit funktioniert und wie wird sie durch menschliches Einwirken zukünftig verändert?

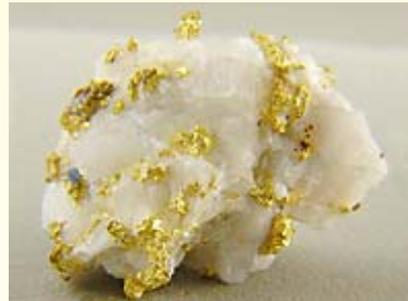
# Teildisziplinen der Geochemie



# Suche nach Rohstoffen

- Lagerstätten sind geochemische Anomalien
- Konzentrationen bestimmter Elemente um ein vielfaches höher als in der normalen Kruste
- Anreicherungen durch magmatische, hydrothermale oder oberflächennahe Prozesse

- *Wo kommen diese Ressourcen vor?*
- *Wie kann man mehr davon finden?*
- *Wie wurden sie gebildet?*



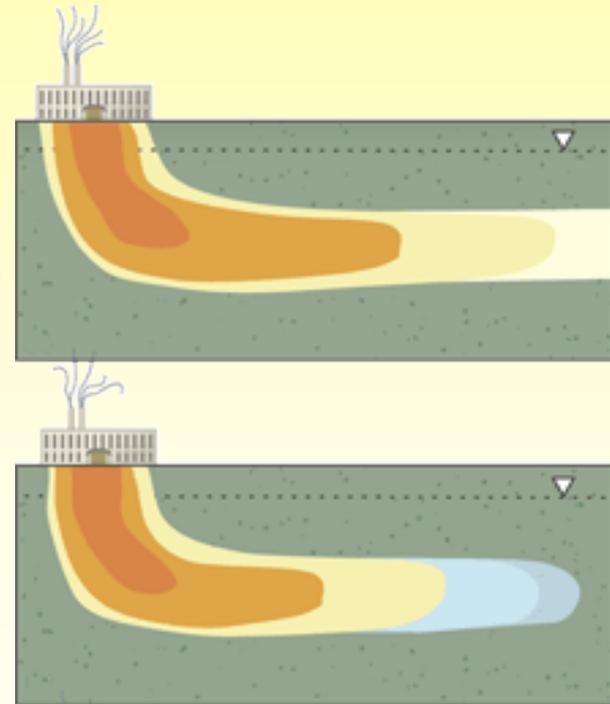
[www.silvasjewelry.com](http://www.silvasjewelry.com)



[geoimages.berkeley.com](http://geoimages.berkeley.com)

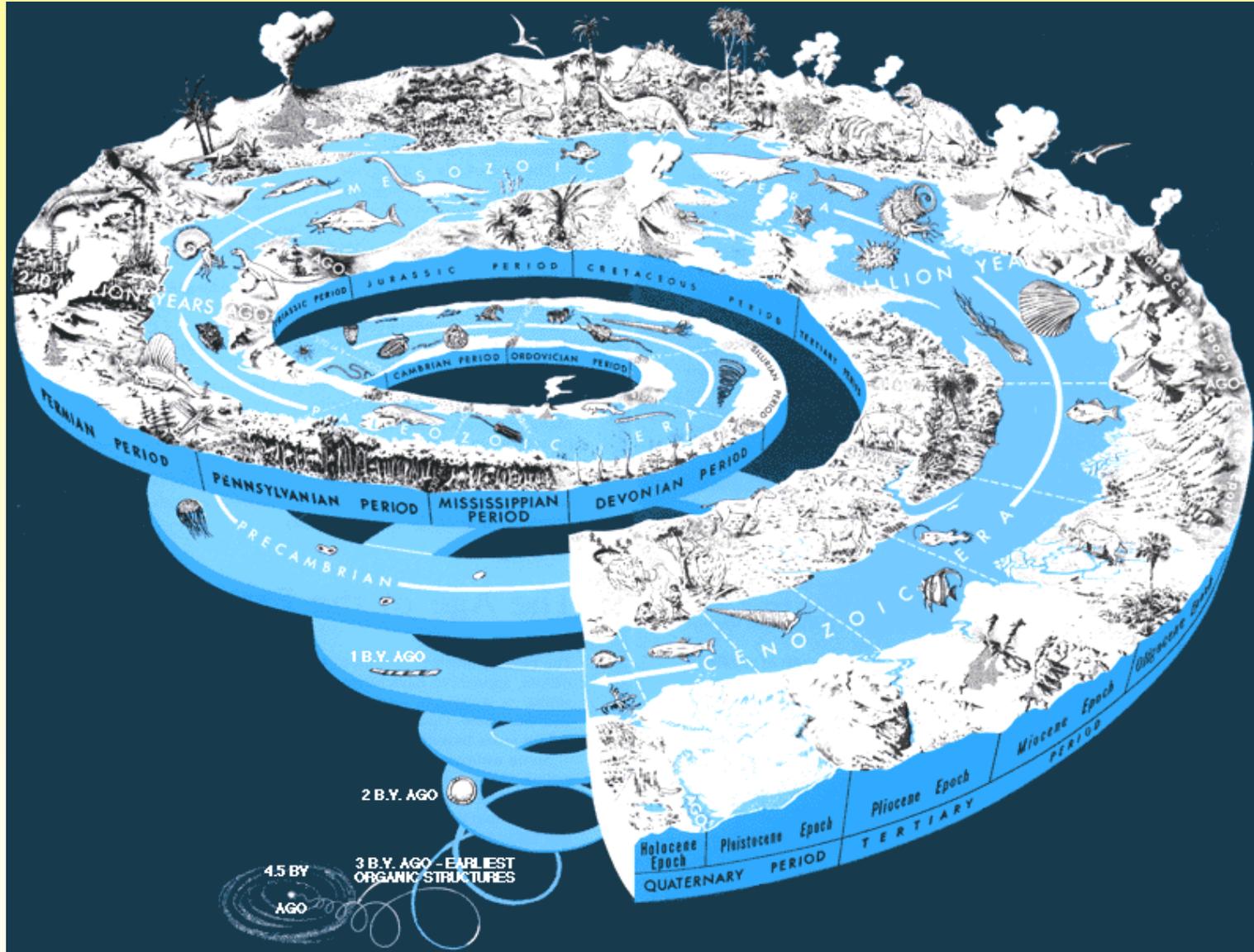
# Grundwasserkontamination und Umweltverschmutzung

- Deponie oder Altlasten: Konzentration von Schadstoffen, Schwermetallen (z.B. Hg, Cr) oder organischen Verbindungen
- *Welche Schadstoffe werden durch Lösungen transportiert?*
- *Wie verändern sich die Transportbedingungen in Abhängigkeit von Druck, Temperatur und Zusammensetzung?*
- *Ab welchen Konzentrationen treten gesundheitliche Gefahren oder Umweltprobleme auf?*



# Geochronologie

## eine Zeitreise in die Vergangenheit

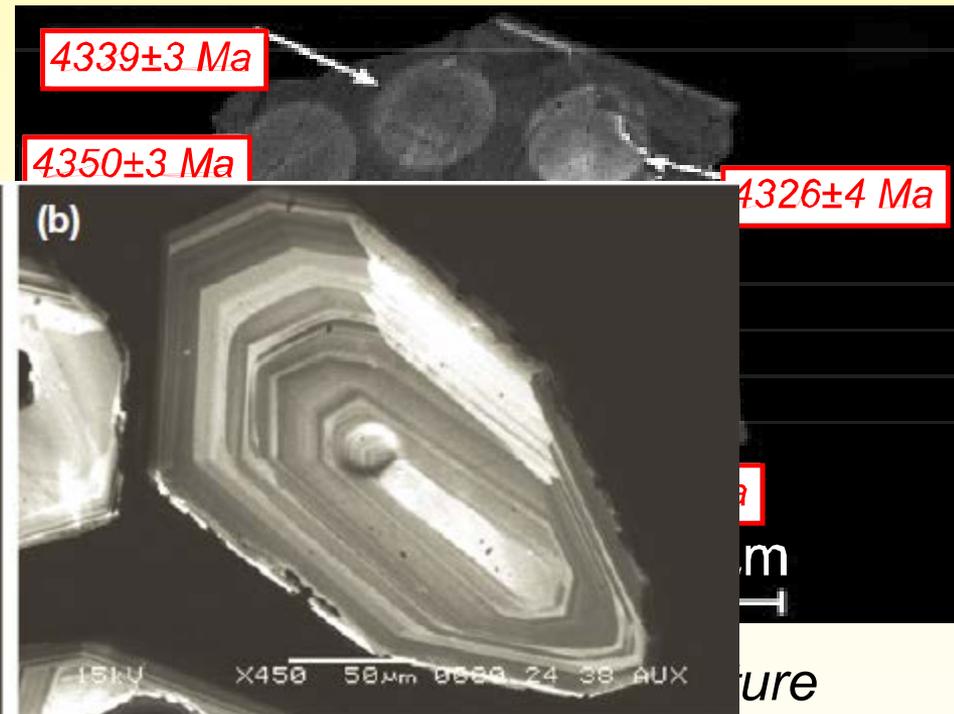
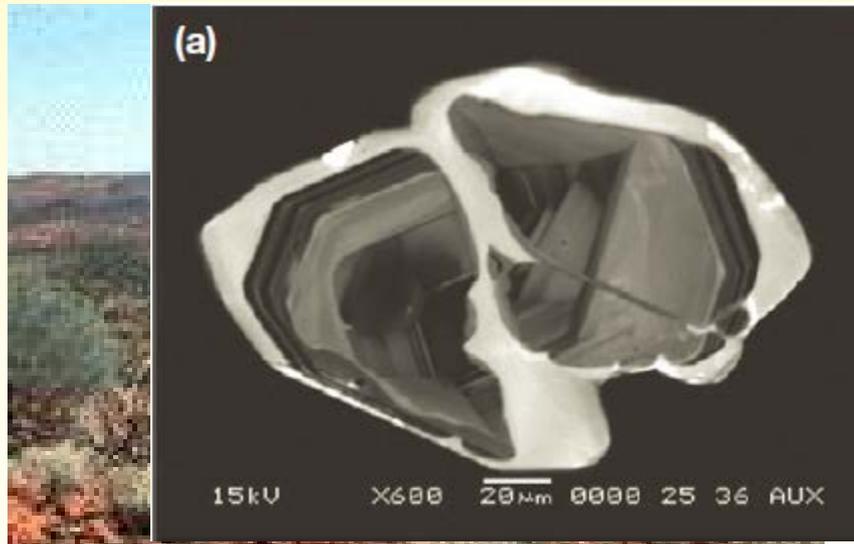
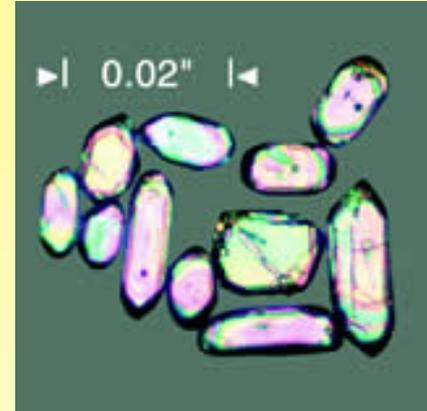


# Geochronologie – die ältesten Gesteine

- Zirkon ( $\text{ZrSiO}_4$ ) – sehr widerstandsfähiges Mineral
- Einzelne Kristalle oder Teile davon lassen sich mit U-Pb Zerfall datieren

## *Jack Hills, Australien*

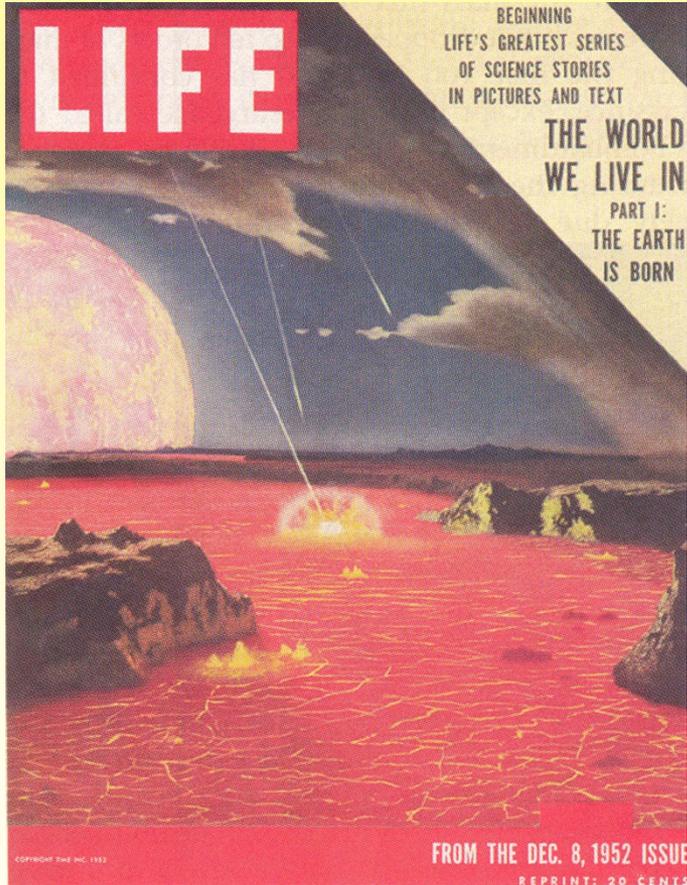
- *Älteste Zirkonalter: ca. 4.3-4.4 Ga.*
- *Sauerstoffisotopie gibt Hinweis auf Wasser an der Erdoberfläche*



m  
T  
ure

# Die frühe Erde: 1956

1956



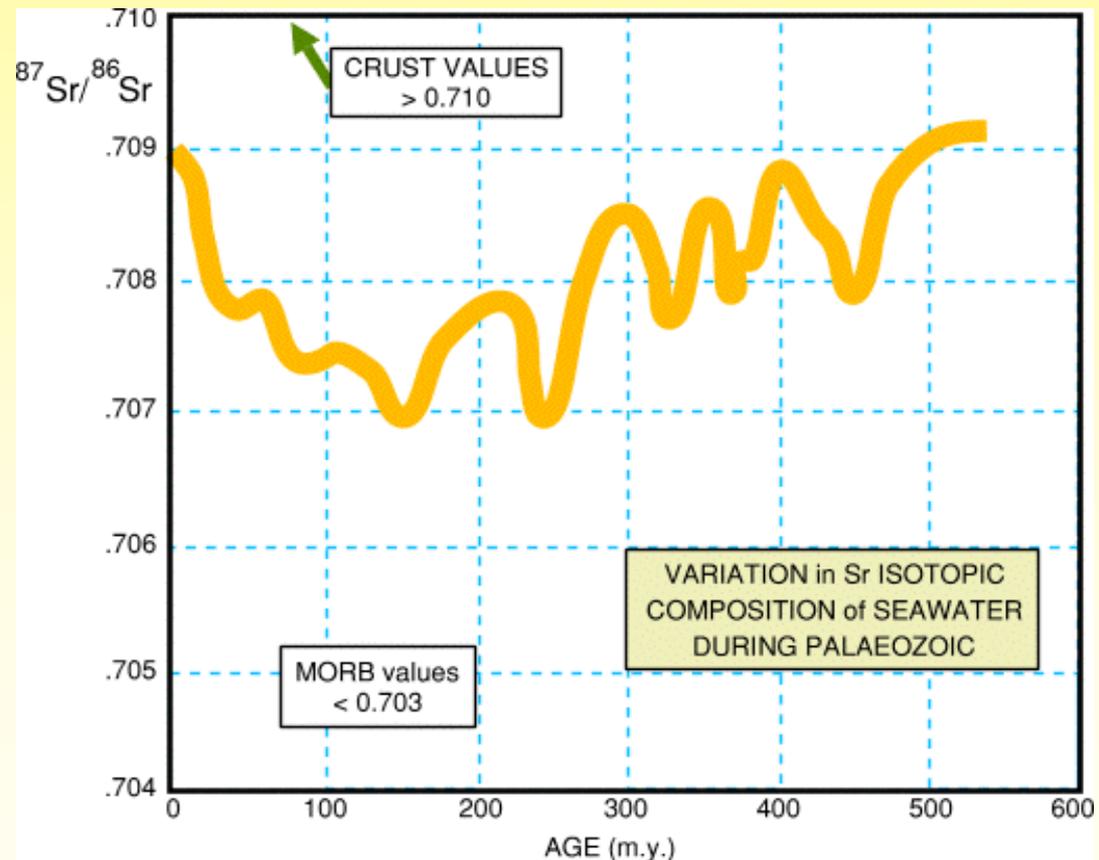
## und heute

2000



# Die Geschichte des Meerwassers

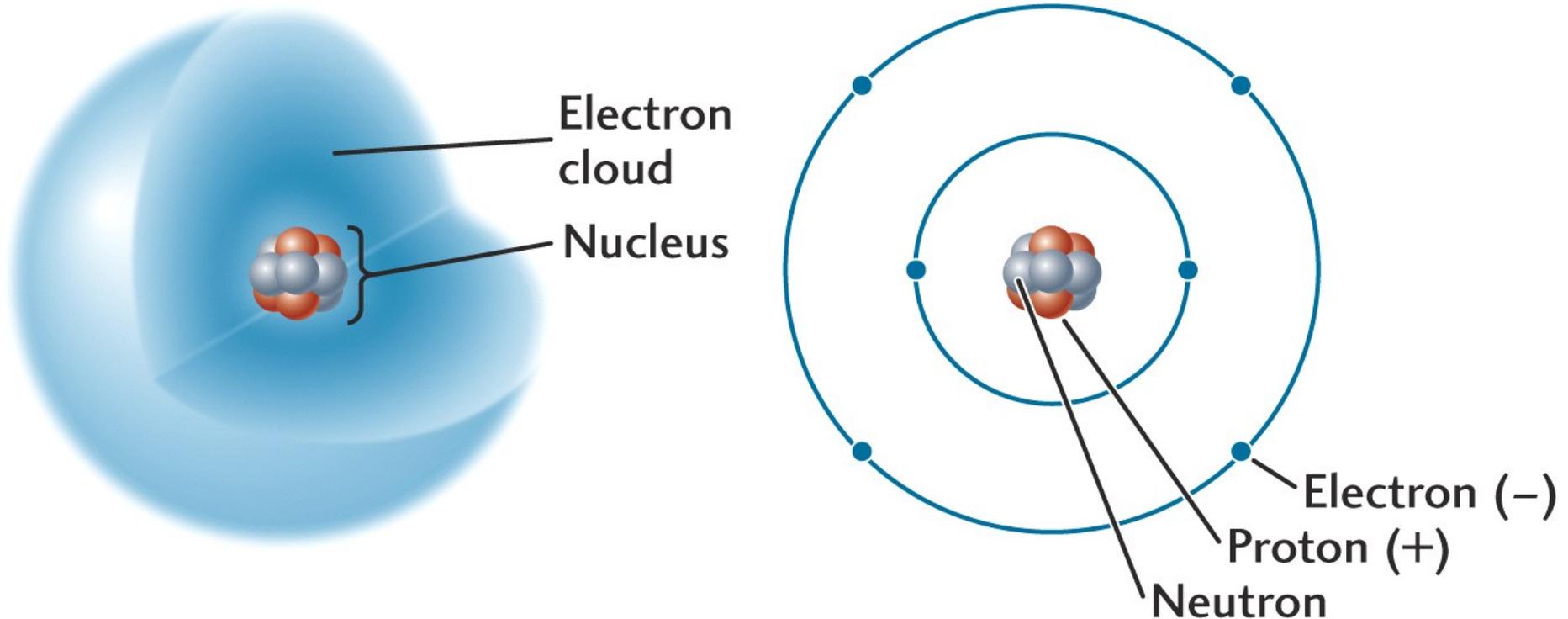
- *Zusammensetzung des Meerwassers variiert - reflektiert variierende Einträge über die Zeit*
- *Isotopenzusammensetzung von Sr reflektiert den wechselnden Anteil von Kontinenten (über Flußsysteme) und Eintrag über mittelozeanische Rücken*
- *Sr-Variationen geben Hinweise auf großräumige geologische Änderungen*



# **Elemente, Atome und chemische Bindungen**

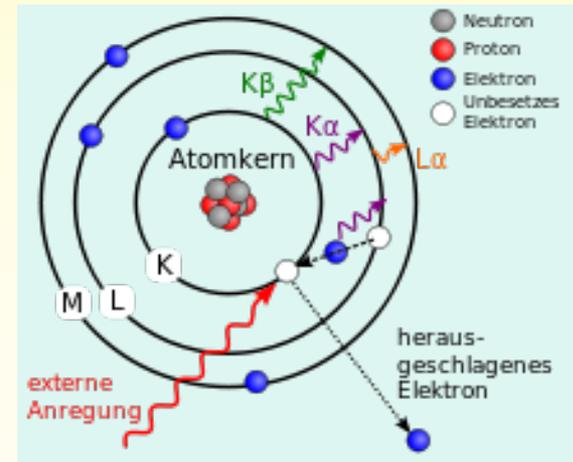
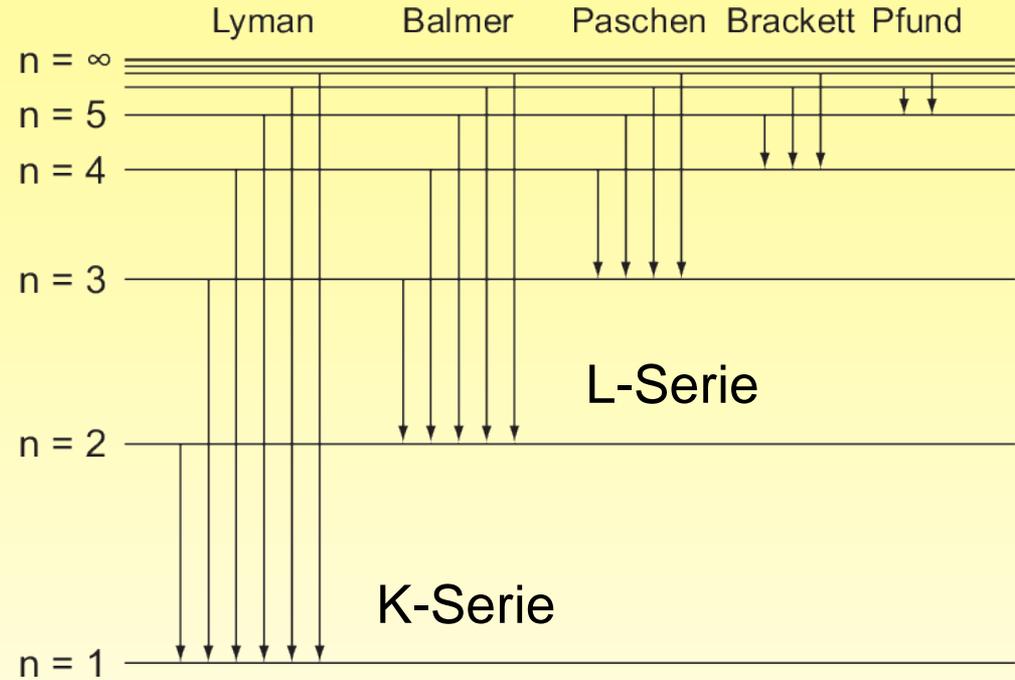
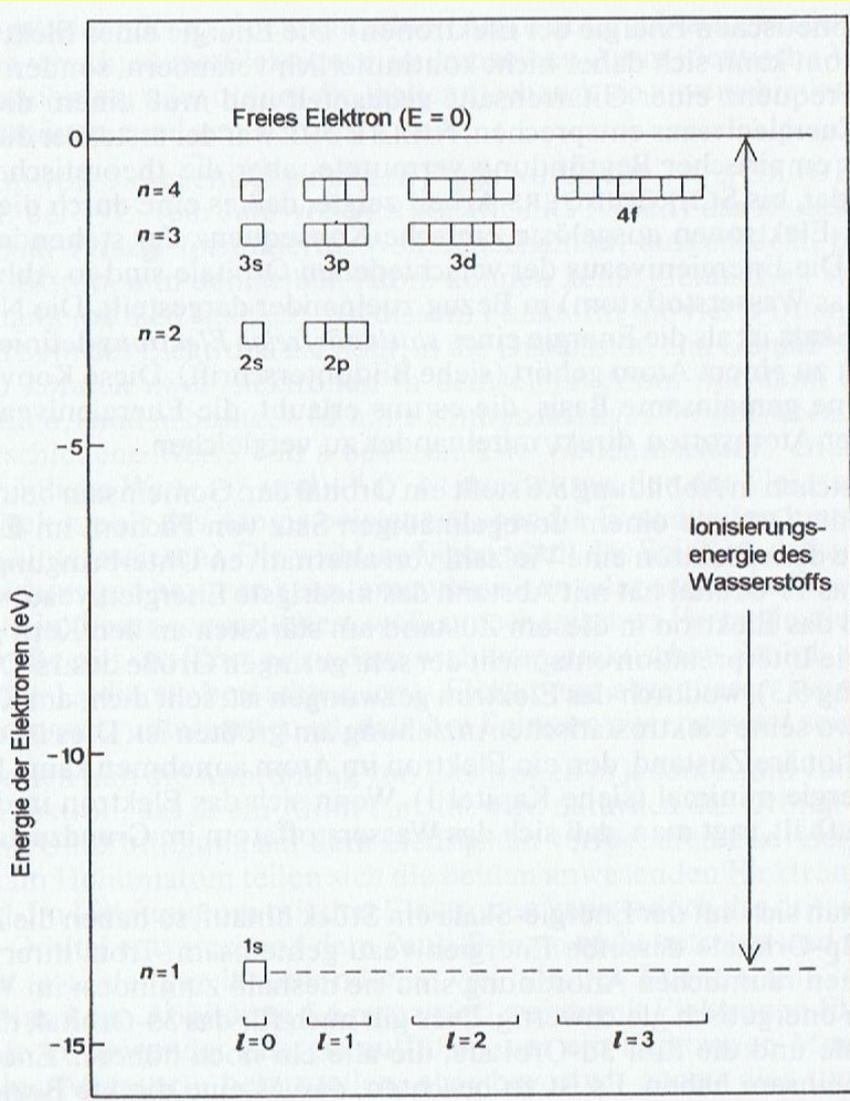
# Chemie beginnt beim Atom

Carbon atom



Carbon - 6 protons, 6-8 neutrons, 6 electrons

# Energieniveaus des Wasserstoffatoms



# Das Periodensystem

**Atomzahl** = Protonenzahl: Zahl der Protonen im Atomkern

**Neutronenzahl**: Zahl der Neutronen im Atomkern

**Isotope**: Atome des gleichen Elements, die die gleiche Atomzahl, aber eine unterschiedliche Masse besitzen

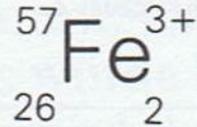
**Atomgewicht**: Gewicht eines Atoms eines Elements, das von der Masse der verschiedenen Isotope und der relativen Häufigkeit dieser Isotope abhängt



# Chemische Symbolik

Die Massenzahl (Z+N)  
gibt ein Isotop des  
Elements genauer an.

Die Ladung des ionisierten Atoms.  
(Alternativ kann die Oxidationsstufe  
durch große römische Ziffern  
angegeben werden.)



Die Ordnungszahl (Z).

Die Anzahl der Atome in dem  
betrachteten Molekül.

# Chemische Symbolik

Avogadro-Zahl - Anzahl der Atome in einem Mol  $^{12}\text{C}$ :  
 $6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  (= 1/amu)

❖ **isotopes**: same Z, different M



❖ **isotopic abundance**:  $\frac{\# \text{ atoms of isotope present}}{\# \text{ atoms of element present}}$

isotope	natural abundance	mass (amu)
carbon-12	98.89 %	12.000000
carbon-13	1.11 %	13.003354
average mass: $12.01_{11}$ amu		

eine Atomare Masseneinheit entspricht  $1.66053 \times 10^{-27} \text{ kg}$

# Elektronen

Analogie zwischen elektromagnetischer Welle und gezupfter Gitarrensaite

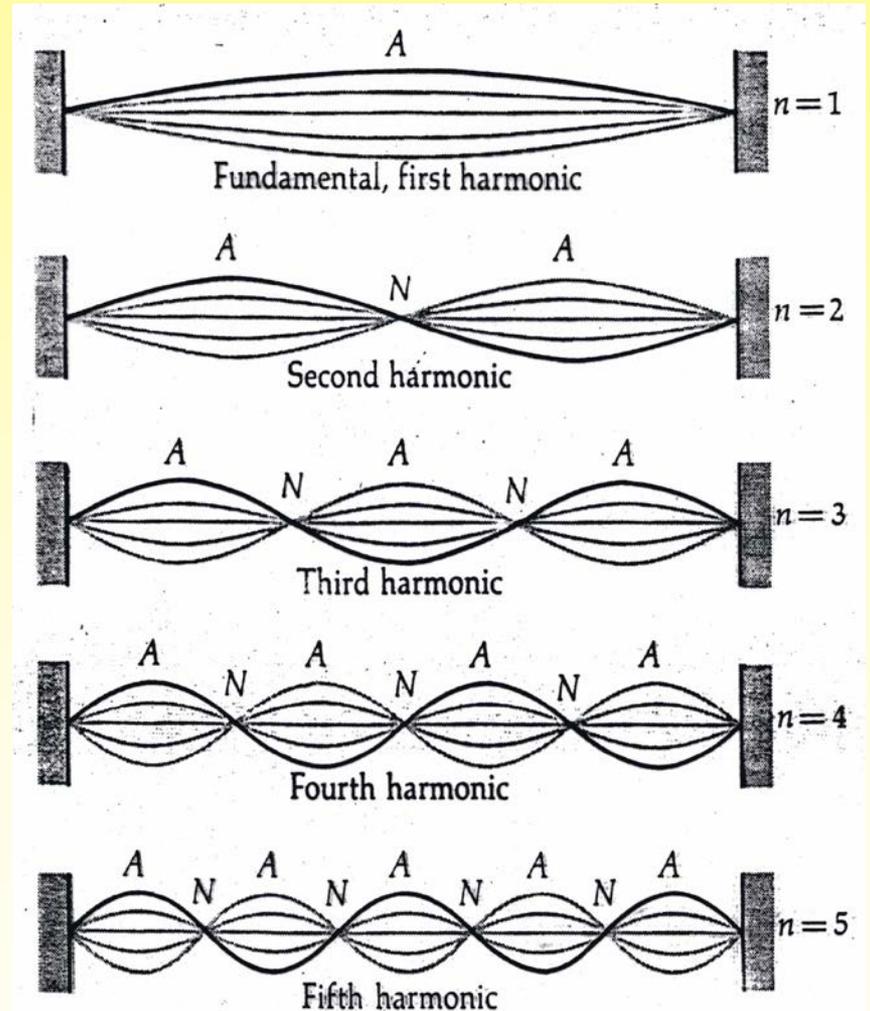
Grundschiwingung

1. Oberschiwingung

2. Oberschiwingung

3. Oberschiwingung

4. Oberschiwingung



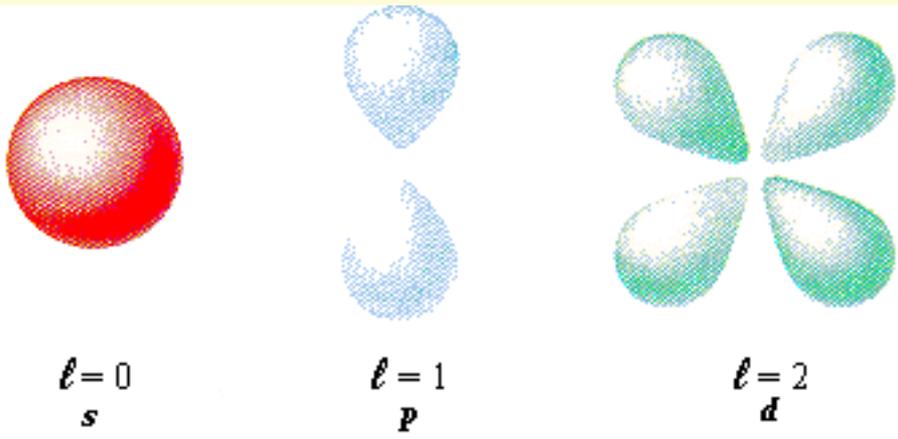
# Das Atom: Quantenzahlen & Orbitale

Verteilung der Elektronendichte kann durch vier Quantenzahlen beschrieben werden

- **$n$  Hauptquantenzahl:** ( $n = 1, 2, 3, \dots$ )

$n$	1	2	3	4	5
shell	K	L	M	N	O

- **$l$  Nebenquantenzahl:** beschreibt die Form des Orbitals (ganze Zahl zwischen 0 und  $n-1$ )



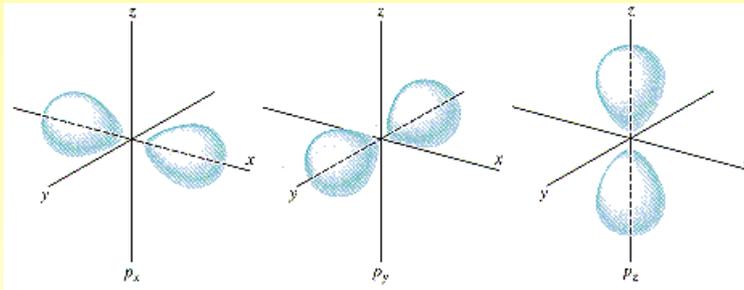
$l = 0$  kugelig (s)

$l = 1$  polar (p)

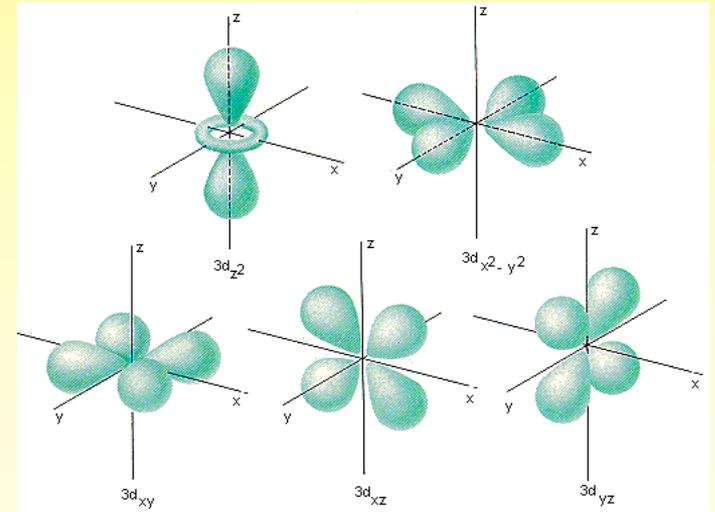
$l = 2$  Kleeblatt (d)

# Das Atom: Quantenzahlen & Orbitale

- ***m*** magnetische Quantenzahl: beschreibt die Lage der orbitale im Raum (-1 bis +1)



p Orbitale ( $l=1 \Rightarrow m=1,0,-1$ )  
∴ drei p Orbitale



d Orbitale ( $l=2 \Rightarrow m=2,1,0,-1,-2$ )  
∴ fünf d Orbitale

- ***s*** Spin Quantenzahl: Drehrichtung des Elektrons (Werte von +1/2 und -1/2)

# Gekürztes Periodensystem

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	H							He
2	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra						

					Nichtmetalle		
		v. a. Halbmetalle					
Metalle							

# Elektronenkonfiguration

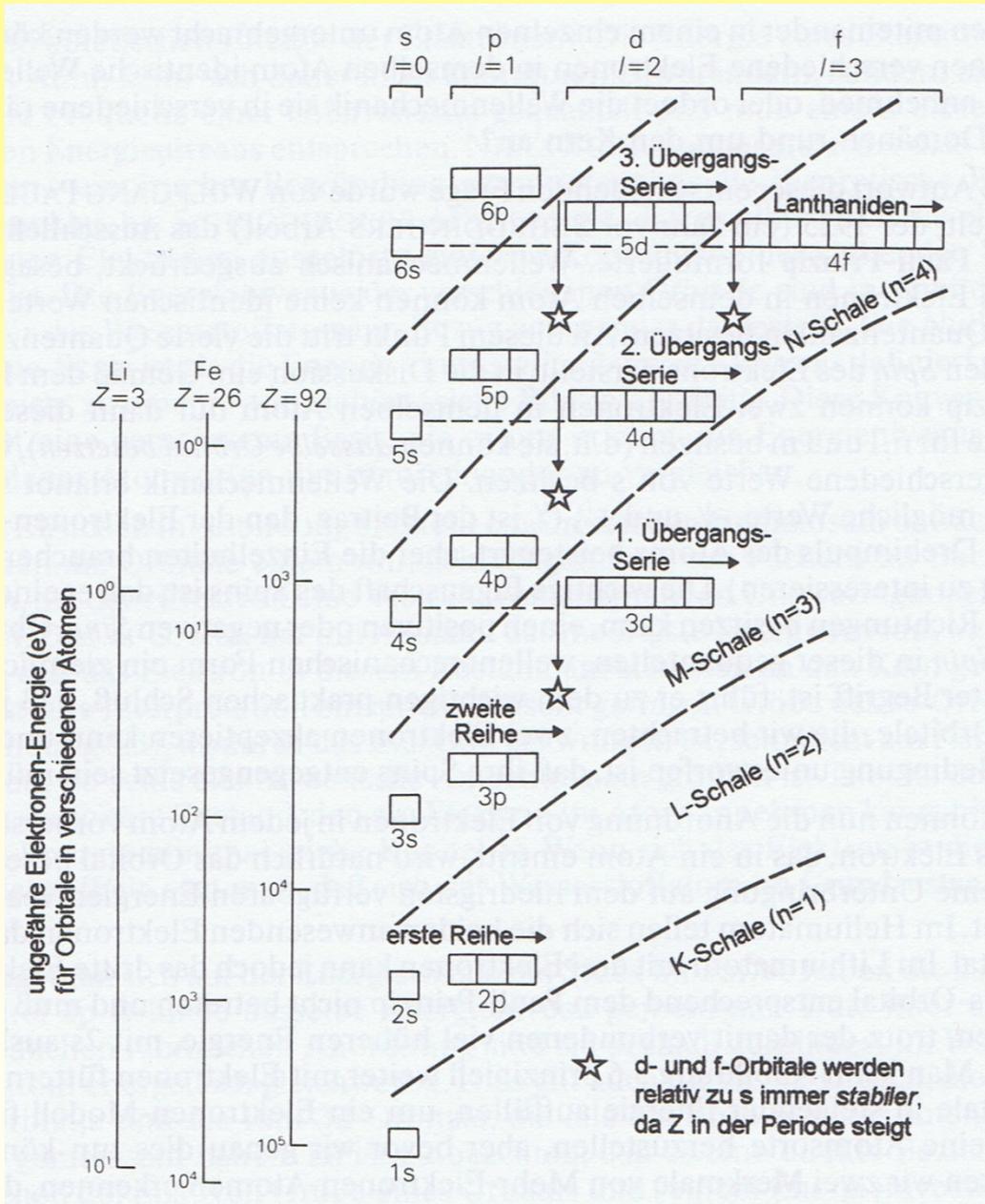
Quantum numbers				Type of
<i>n</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>s</i>	Orbital
1	0	0	+1/2, -1/2	1s
2	0	0	+1/2, -1/2	2s
2	1	0	+1/2, -1/2	2p
2	1	1	+1/2, -1/2	2p
2	1	-1	+1/2, -1/2	2p
3	0	0	+1/2, -1/2	3s
3	1	0	+1/2, -1/2	3p
3	1	1	+1/2, -1/2	3p
3	1	-1	+1/2, -1/2	3p
3	2	0	+1/2, -1/2	3d
3	2	1	+1/2, -1/2	3d
3	2	-1	+1/2, -1/2	3d
3	2	2	+1/2, -1/2	3d
3	2	-2	+1/2, -1/2	3d
etc				

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	H							He
2	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra						

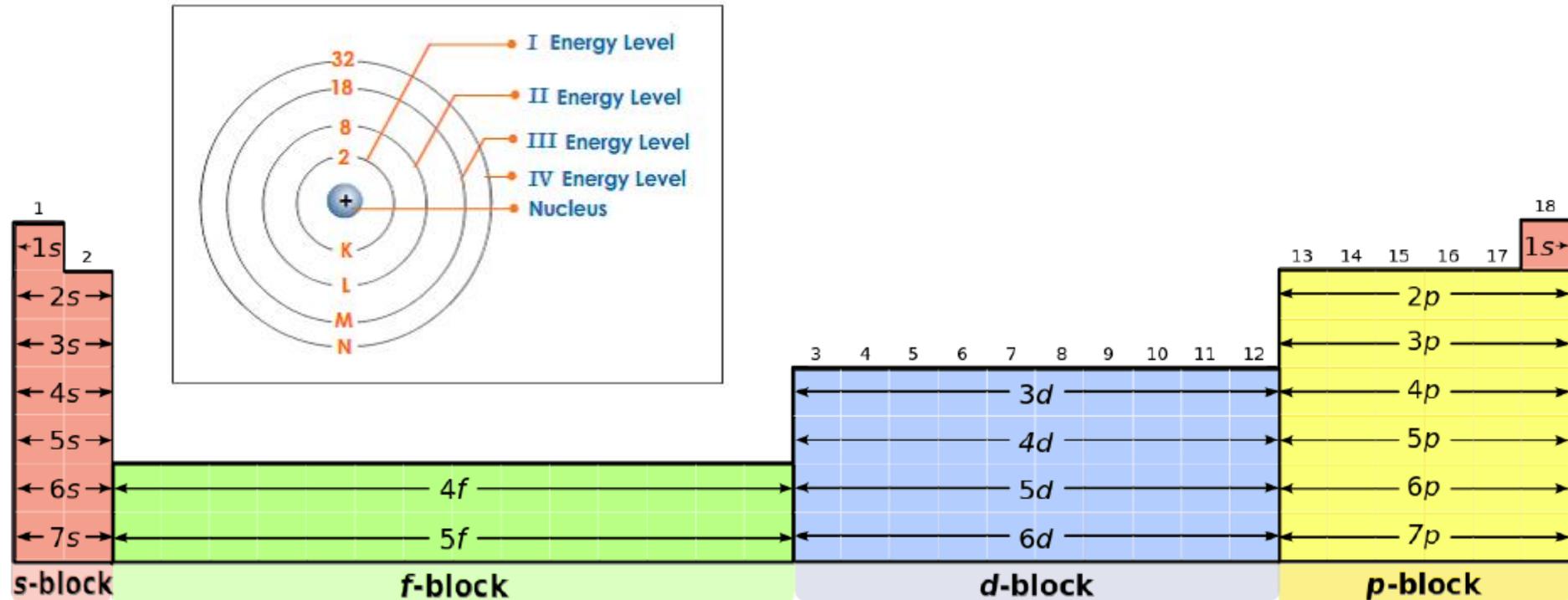
  

Metalle	v. a. Halbmetalle	Nichtmetalle

# Energieniveaustruktur in komplexen Atomen

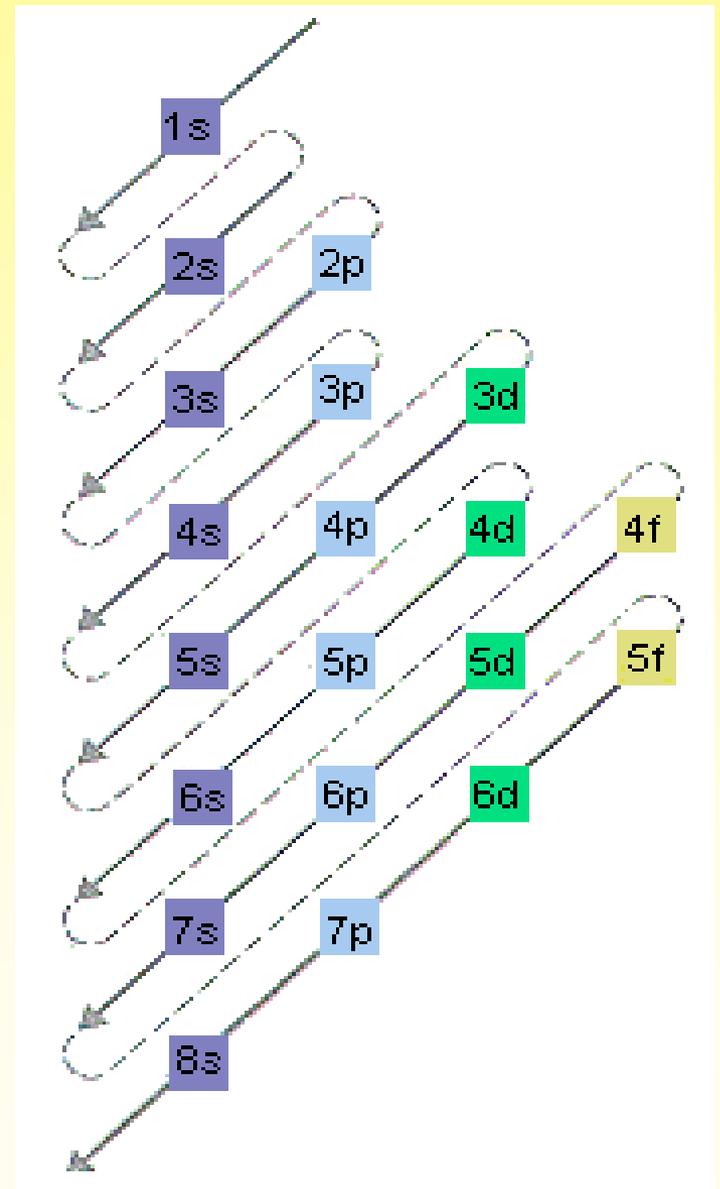
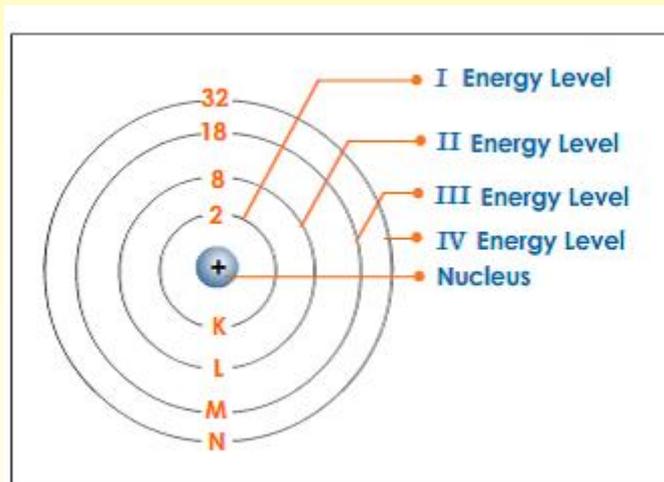


# Elektronenkonfigurationen



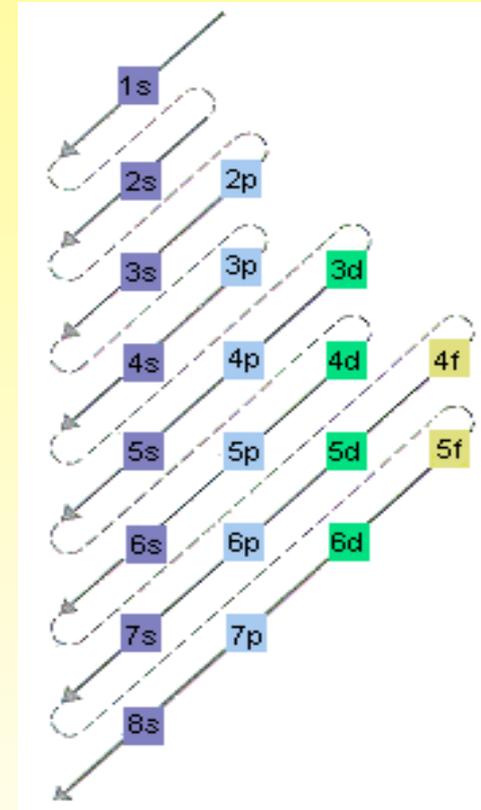
# Elektronenkonfiguration

## Reihenfolge der Orbitalbesetzungen



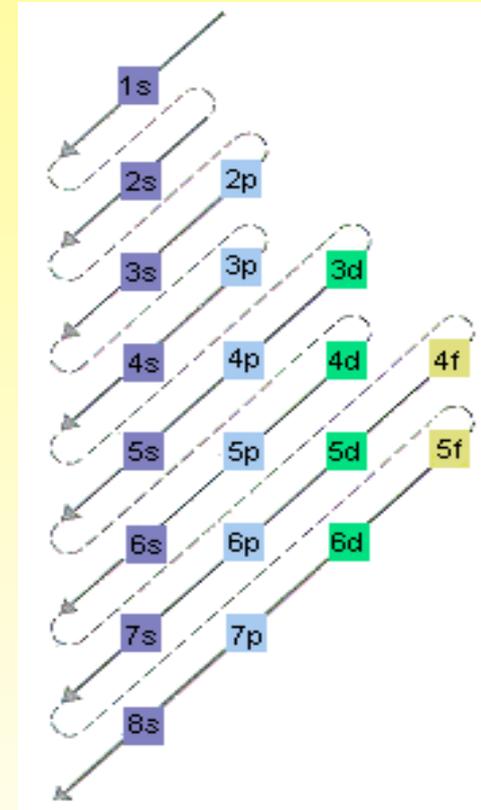
# Elektronenkonfiguration

Z	symbol	element	electronic structure
1	H	hydrogen	$1s^1$
2	<b>He</b>	helium	$1s^2$
3	Li	lithium	$[\text{He}]2s^1$
4	Be	beryllium	$[\text{He}]2s^2$
5	B	boron	$[\text{He}]2s^2 2p^1$
6	C	carbon	$[\text{He}]2s^2 2p^2$
7	N	nitrogen	$[\text{He}]2s^2 2p^3$
8	O	oxygen	$[\text{He}]2s^2 2p^4$
9	F	fluorine	$[\text{He}]2s^2 2p^5$
10	<b>Ne</b>	neon	$[\text{He}]2s^2 2p^6$
11	Na	sodium	$[\text{Ne}]3s^1$
12	Mg	magnesium	$[\text{Ne}]3s^2$
13	Al	aluminium	$[\text{Ne}]3s^2 3p^1$
14	Si	silicon	$[\text{Ne}]3s^2 3p^2$
15	P	phosphorus	$[\text{Ne}]3s^2 3p^3$
16	S	sulphur	$[\text{Ne}]3s^2 3p^4$
17	Cl	chlorine	$[\text{Ne}]3s^2 3p^5$
18	<b>Ar</b>	argon	$[\text{Ne}]3s^2 3p^6$
19	K	potassium	$[\text{Ar}]4s^1$
20	Ca	calcium	$[\text{Ar}]4s^2$



# Elektronenkonfiguration

Z	symbol	element	electronic structure
21	Sc	scandium	[Ar]3d <sup>1</sup> 4s <sup>2</sup>
22	Ti	titanium	[Ar]3d <sup>2</sup> 4s <sup>2</sup>
23	V	vanadium	[Ar]3d <sup>3</sup> 4s <sup>2</sup>
<b>24</b>	<b>Cr</b>	<b>chromium</b>	<b>[Ar]3d<sup>5</sup>4s<sup>1</sup></b>
25	Mn	manganese	[Ar]3d <sup>5</sup> 4s <sup>2</sup>
26	Fe	iron	[Ar]3d <sup>6</sup> 4s <sup>2</sup>
27	Co	cobalt	[Ar]3d <sup>7</sup> 4s <sup>2</sup>
28	Ni	nickel	[Ar]3d <sup>8</sup> 4s <sup>2</sup>
<b>29</b>	<b>Cu</b>	<b>copper</b>	<b>[Ar]3d<sup>10</sup>4s<sup>1</sup></b>
30	Zn	zinc	[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup>
31	Ga	gallium	[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>1</sup>
32	Ge	germanium	[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>2</sup>
33	As	arsenic	[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>3</sup>
34	Se	selenium	[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>4</sup>
35	Br	bromine	[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>5</sup>
36	<b>Kr</b>	krypton	[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>6</sup>
37	Rb	rubidium	[Kr]5s <sup>1</sup>
38	Sr	strontium	[Kr]5s <sup>2</sup>
39	Y	yttrium	[Kr]4d <sup>1</sup> 5s <sup>2</sup>
40	Zr	zirconium	[Kr]4d <sup>2</sup> 5s <sup>2</sup>



# PERIODENSYSTEM DER ELEMENTE

<http://www.periodni.com/de/>

PERIODEN

GRUPPE

1 **IA**

1 1.0079  
**H**  
WASSERSTOFF

3 6.941 **Li**  
LITHIUM

11 22.990 **Na**  
NATRIUM

19 39.098 **K**  
KALIUM

37 85.468 **Rb**  
RUBIDIUM

55 132.91 **Cs**  
CÄSIUM

87 (223) **Fr**  
FRANCIUM

2 **IIA**

4 9.0122 **Be**  
BERYLLIUM

12 24.305 **Mg**  
MAGNESIUM

20 40.078 **Ca**  
CALCIUM

38 87.62 **Sr**  
STRONTIUM

56 137.33 **Ba**  
BARIUM

88 (226) **Ra**  
RADIUM

3 **IIIB**

21 44.956 **Sc**  
SCANDIUM

39 88.906 **Y**  
YTTRIUM

72 178.49 **Hf**  
HAFNIUM

104 (267) **Rf**  
RUTHERFORDIUM

106 (271) **Sg**  
SEABORGIUM

108 (277) **Hs**  
HASSIUM

110 (281) **Ds**  
DARMSTADIUM

4 **IVB**

22 47.867 **Ti**  
TITAN

40 91.224 **Zr**  
ZIRKON

74 183.84 **W**  
WOLFRAM

106 (271) **Sg**  
SEABORGIUM

108 (277) **Hs**  
HASSIUM

110 (281) **Ds**  
DARMSTADIUM

112 (285) **Cn**  
COPERNICIUM

5 **VB**

23 50.942 **V**  
VANADIUM

41 92.906 **Nb**  
NIOB

73 180.95 **Ta**  
TANTAL

105 (268) **Db**  
DUBNIUM

107 (272) **Bh**  
BOHRNIUM

109 (276) **Mt**  
MEITNERIUM

111 (280) **Rg**  
ROENTGENIUM

6 **VIB**

24 51.996 **Cr**  
CHROM

42 95.96 **Mo**  
MOLYBDÄN

74 183.84 **W**  
WOLFRAM

106 (271) **Sg**  
SEABORGIUM

108 (277) **Hs**  
HASSIUM

110 (281) **Ds**  
DARMSTADIUM

112 (285) **Cn**  
COPERNICIUM

7 **VIIIB**

25 54.938 **Mn**  
MANGAN

43 (98) **Tc**  
TECHNETIUM

75 186.21 **Re**  
RHENIUM

107 (272) **Bh**  
BOHRNIUM

109 (276) **Mt**  
MEITNERIUM

111 (280) **Rg**  
ROENTGENIUM

113 (...) **Uut**  
UNUNTRIUM

8

26 55.845 **Fe**  
EISEN

44 101.07 **Ru**  
RUTHENIUM

76 190.23 **Os**  
OSMIUM

108 (277) **Hs**  
HASSIUM

110 (281) **Ds**  
DARMSTADIUM

112 (285) **Cn**  
COPERNICIUM

114 (287) **Fl**  
FLEROVIUM

9 **VIIIB**

27 58.933 **Co**  
KOBALT

45 102.91 **Rh**  
RHODIUM

77 192.22 **Ir**  
IRIDIUM

109 (276) **Mt**  
MEITNERIUM

111 (280) **Rg**  
ROENTGENIUM

113 (...) **Uut**  
UNUNTRIUM

115 (...) **Uup**  
UNUNPENTIUM

10

28 58.693 **Ni**  
NICKEL

46 106.42 **Pd**  
PALLADIUM

78 195.08 **Pt**  
PLATIN

110 (281) **Ds**  
DARMSTADIUM

112 (285) **Cn**  
COPERNICIUM

114 (287) **Fl**  
FLEROVIUM

11 **IB**

29 63.546 **Cu**  
KUPFER

47 107.87 **Ag**  
SILBER

79 196.97 **Au**  
GOLD

111 (280) **Rg**  
ROENTGENIUM

113 (...) **Uut**  
UNUNTRIUM

115 (...) **Uup**  
UNUNPENTIUM

12 **IIB**

30 65.38 **Zn**  
ZINK

48 112.41 **Cd**  
KADMIUM

80 200.59 **Hg**  
QUECKSILBER

112 (285) **Cn**  
COPERNICIUM

114 (287) **Fl**  
FLEROVIUM

13 **IIIA**

13 26.982 **Al**  
ALUMINIUM

31 69.723 **Ga**  
GALLIUM

49 114.82 **In**  
INDIUM

81 204.38 **Tl**  
THALLIUM

113 (...) **Uut**  
UNUNTRIUM

115 (...) **Uup**  
UNUNPENTIUM

14 **IVA**

14 28.086 **Si**  
SILIZIUM

32 72.64 **Ge**  
GERMANIUM

50 118.71 **Sn**  
ZINN

82 207.2 **Pb**  
BLEI

114 (287) **Fl**  
FLEROVIUM

116 (291) **Lv**  
LIVERMORIUM

15 **VA**

15 30.974 **P**  
PHOSPHOR

33 74.922 **As**  
ARSEN

51 121.76 **Sb**  
ANTIMON

83 208.98 **Bi**  
BISMUT

115 (...) **Uup**  
UNUNPENTIUM

117 (...) **Uus**  
UNUNSEPTIUM

16 **VIA**

16 32.065 **S**  
SCHWEFEL

34 78.96 **Se**  
SELEN

52 127.60 **Te**  
TELLUR

84 (209) **Po**  
POLONIUM

116 (291) **Lv**  
LIVERMORIUM

118 (...) **Uuo**  
UNUNOCTIUM

17 **VIIA**

17 35.453 **Cl**  
CHLOR

35 79.904 **Br**  
BROM

53 126.90 **I**  
IOD

85 (210) **At**  
ASTAT

117 (...) **Uus**  
UNUNSEPTIUM

119 (...) **Uue**  
UNUNNONIUM

18 **VIIIA**

18 39.948 **Ar**  
ARGON

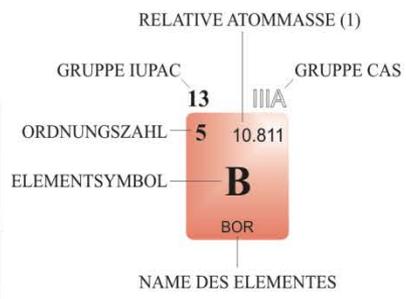
36 83.798 **Kr**  
KRYPTON

54 131.29 **Xe**  
XENON

86 (222) **Rn**  
RADON

118 (...) **Uuo**  
UNUNOCTIUM

120 (...) **Uuq**  
UNUNQUADIUM



Metalle Halbmetalle Nichtmetalle  
Alkalimetalle Erdalkalimetalle Ubergangselemente Lanthaniden Actiniden  
Chalkogene Halogene Edelgase  
ZUSTAND (25 °C; 101 kPa)  
Ne - gasförmig Fe - fest  
Hg - flüssig Tc - künstliche

## LANTHANIDEN

57 138.91 <b>La</b> LANTHAN	58 140.12 <b>Ce</b> CER	59 140.91 <b>Pr</b> PRASEODYM	60 144.24 <b>Nd</b> NEODYM	61 (145) <b>Pm</b> PROMETHIUM	62 150.36 <b>Sm</b> SAMARIUM	63 151.96 <b>Eu</b> EUROPIUM	64 157.25 <b>Gd</b> GADOLINIUM	65 158.93 <b>Tb</b> TERBIUM	66 162.50 <b>Dy</b> DYSPROSIUM	67 164.93 <b>Ho</b> HOLMIUM	68 167.26 <b>Er</b> ERBIUM	69 168.93 <b>Tm</b> THULIUM	70 173.05 <b>Yb</b> YTTERBIUM	71 174.97 <b>Lu</b> LUTETIUM
--------------------------------	----------------------------	----------------------------------	-------------------------------	----------------------------------	---------------------------------	---------------------------------	-----------------------------------	--------------------------------	-----------------------------------	--------------------------------	-------------------------------	--------------------------------	----------------------------------	---------------------------------

## ACTINIDEN

89 (227) <b>Ac</b> ACTINIUM	90 232.04 <b>Th</b> THORIUM	91 231.04 <b>Pa</b> PROTACTINIUM	92 238.03 <b>U</b> URAN	93 (237) <b>Np</b> NEPTUNIUM	94 (244) <b>Pu</b> PLUTONIUM	95 (243) <b>Am</b> AMERICIUM	96 (247) <b>Cm</b> CURIUM	97 (247) <b>Bk</b> BERKELIUM	98 (251) <b>Cf</b> CALIFORNIUM	99 (252) <b>Es</b> EINSTEINIUM	100 (257) <b>Fm</b> FERMIUM	101 (258) <b>Md</b> MENDELEVIUM	102 (259) <b>No</b> NOBELIUM	103 (262) <b>Lr</b> LAWRENCIUM
--------------------------------	--------------------------------	-------------------------------------	----------------------------	---------------------------------	---------------------------------	---------------------------------	------------------------------	---------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	--------------------------------	------------------------------------	---------------------------------	-----------------------------------

# Chemische Eigenschaften der Elemente

- Elektronen in den äußersten Schalen nehmen an den chemischen Bindungen teil: Elemente innerhalb der gleichen Gruppe (Spalten) haben die gleiche Konfiguration der äußeren Elektronen und verhalten sich deshalb ähnlich

## **Ionisierungspotential:**

Erstes Ionisierungspotential:

Energie, die erforderlich ist, um das am wenigsten stark gebundene Elektron zu entfernen

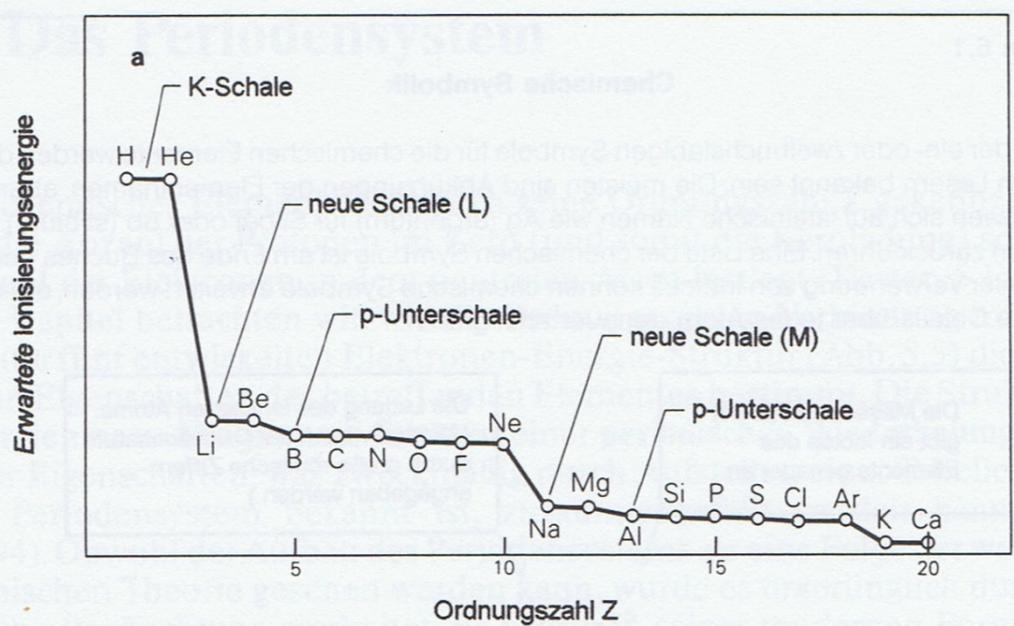


Zweites Ionisierungspotential:

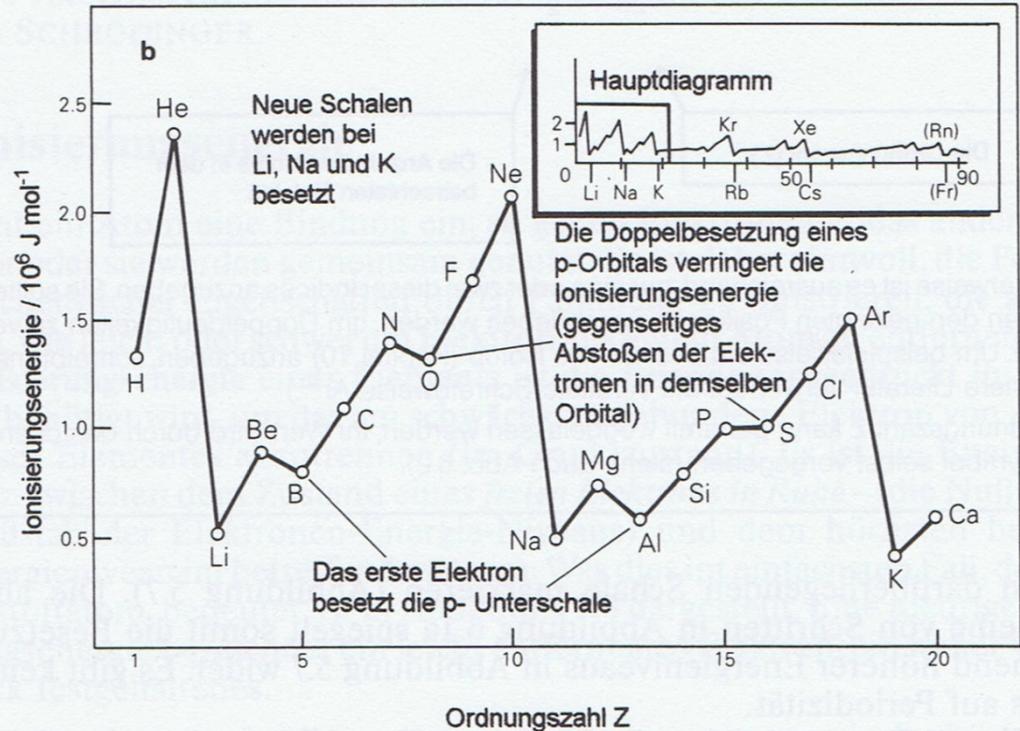
Erforderliche Energie, um ein zweites Elektron zu entfernen

# Ionisierungsenergie

ohne Berücksichtigung steigender Kernladung

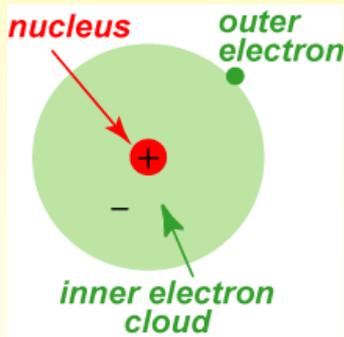


mit Berücksichtigung steigender Kernladung

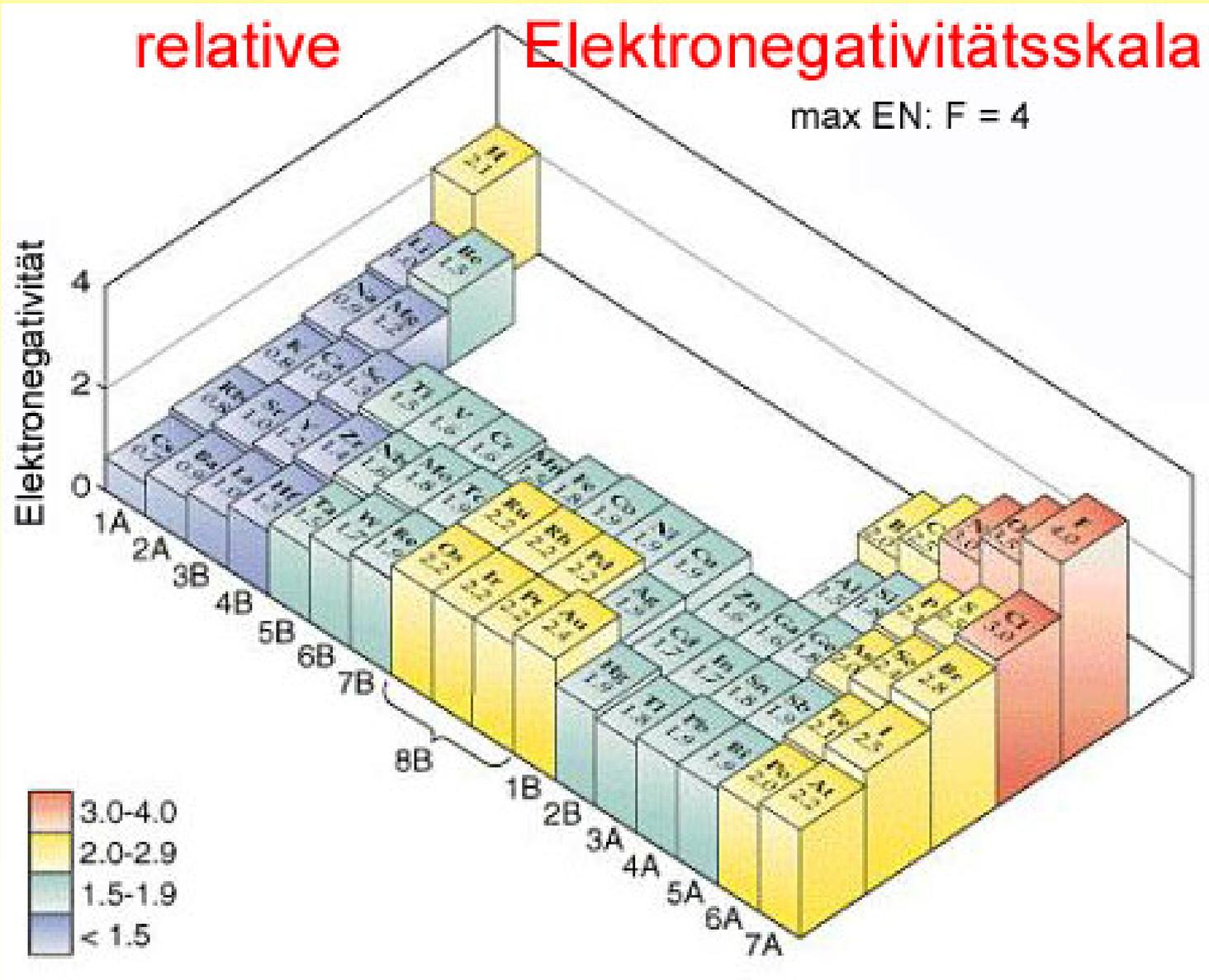


# Alkalimetalle: geringe Ionisierungsenergie

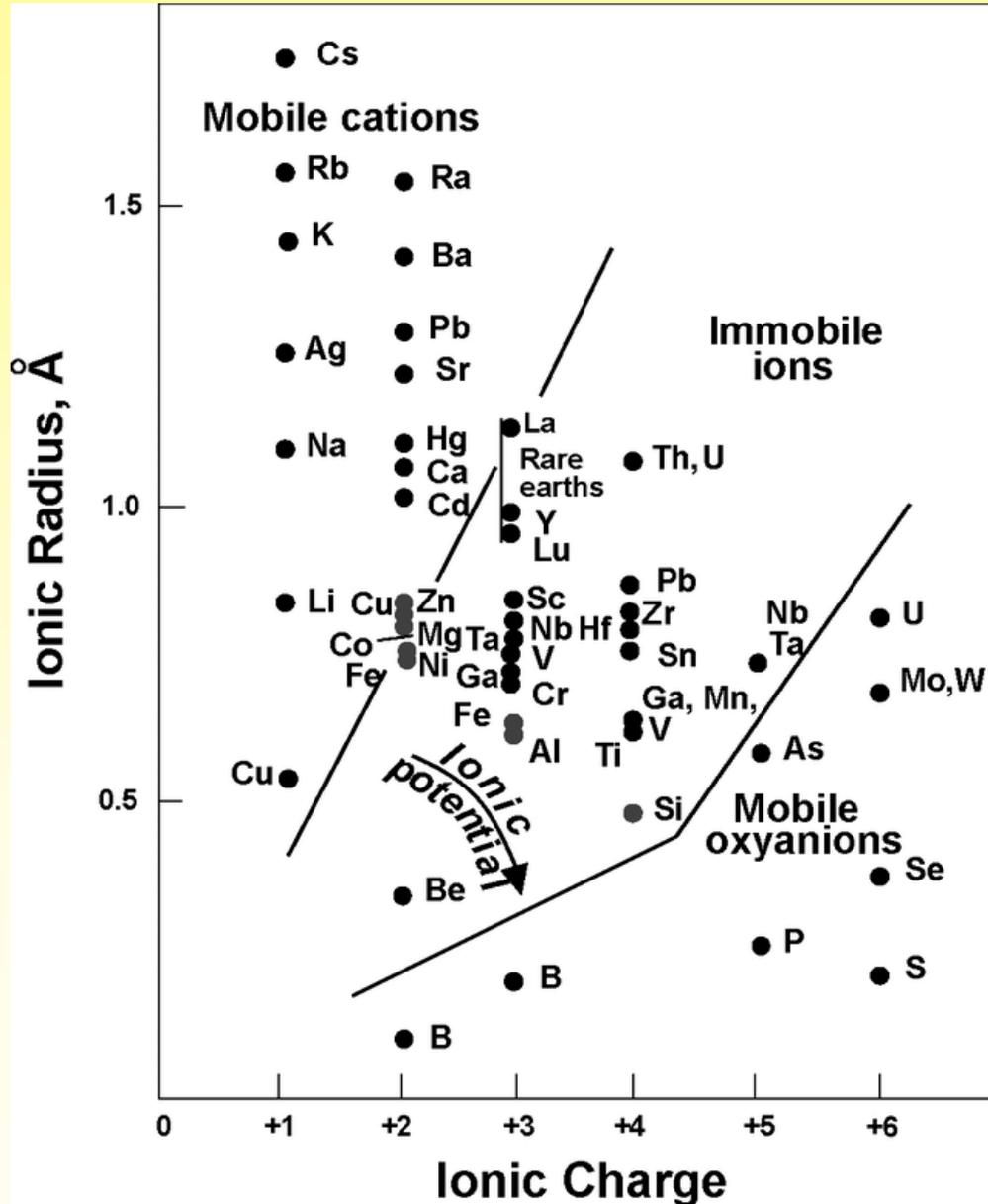
Die Ionisierungsenergien der **Alkalimetalle** stellen in jeder Periode das Minimum dar



# Elektronegativität



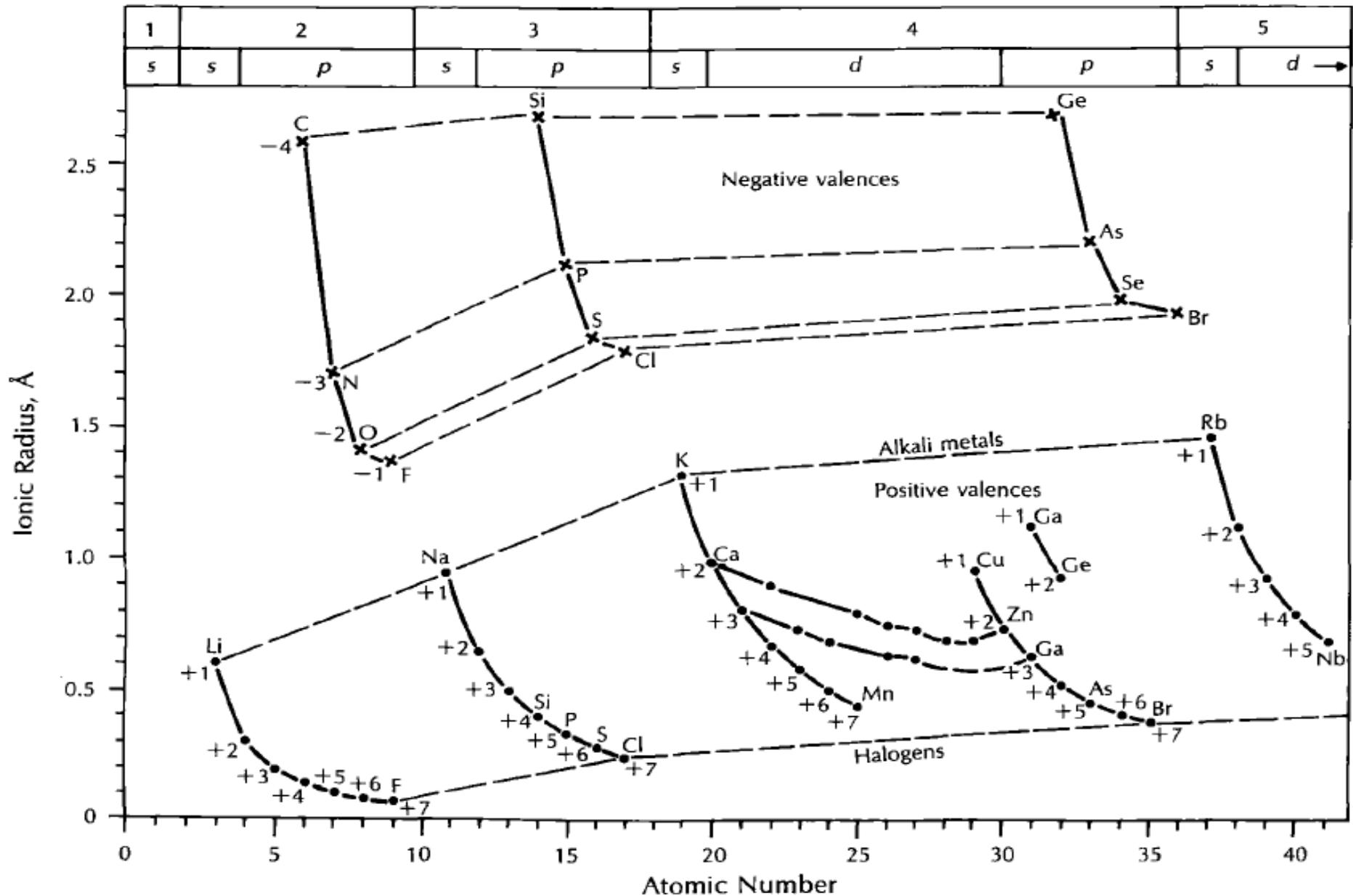
# Ionenpotential, IP



IP = Wertigkeit eines Ions geteilt durch einen Ionenradius.

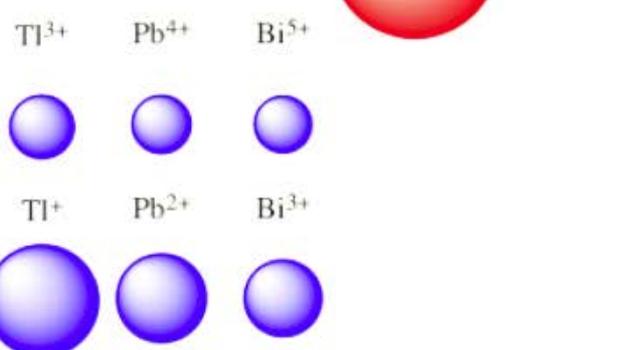
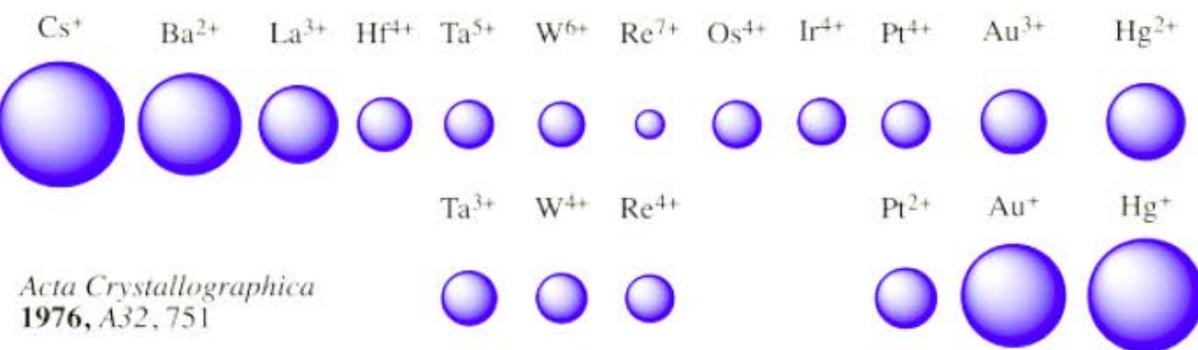
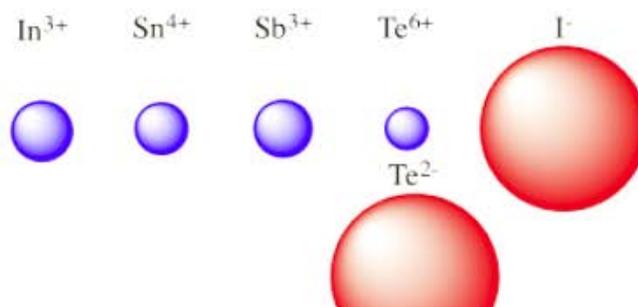
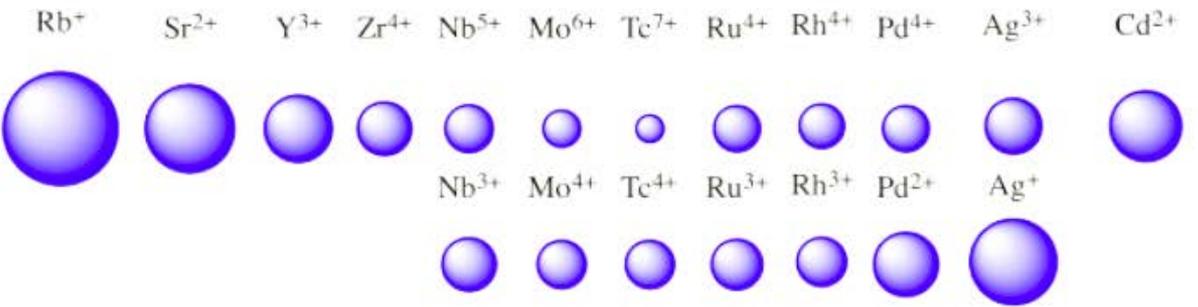
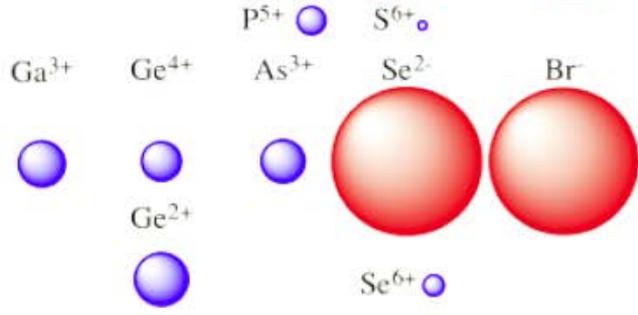
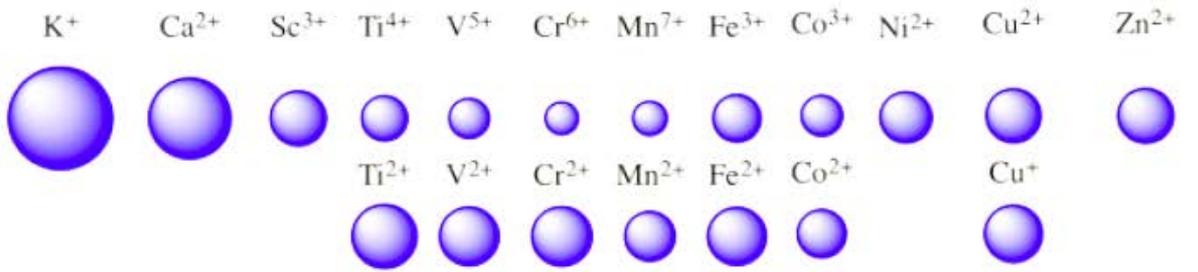
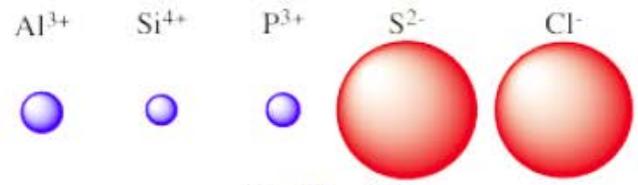
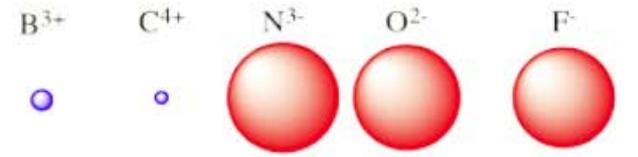
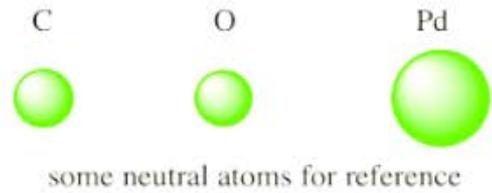
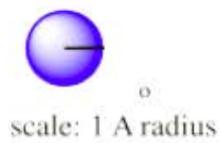
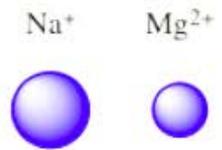
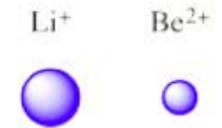
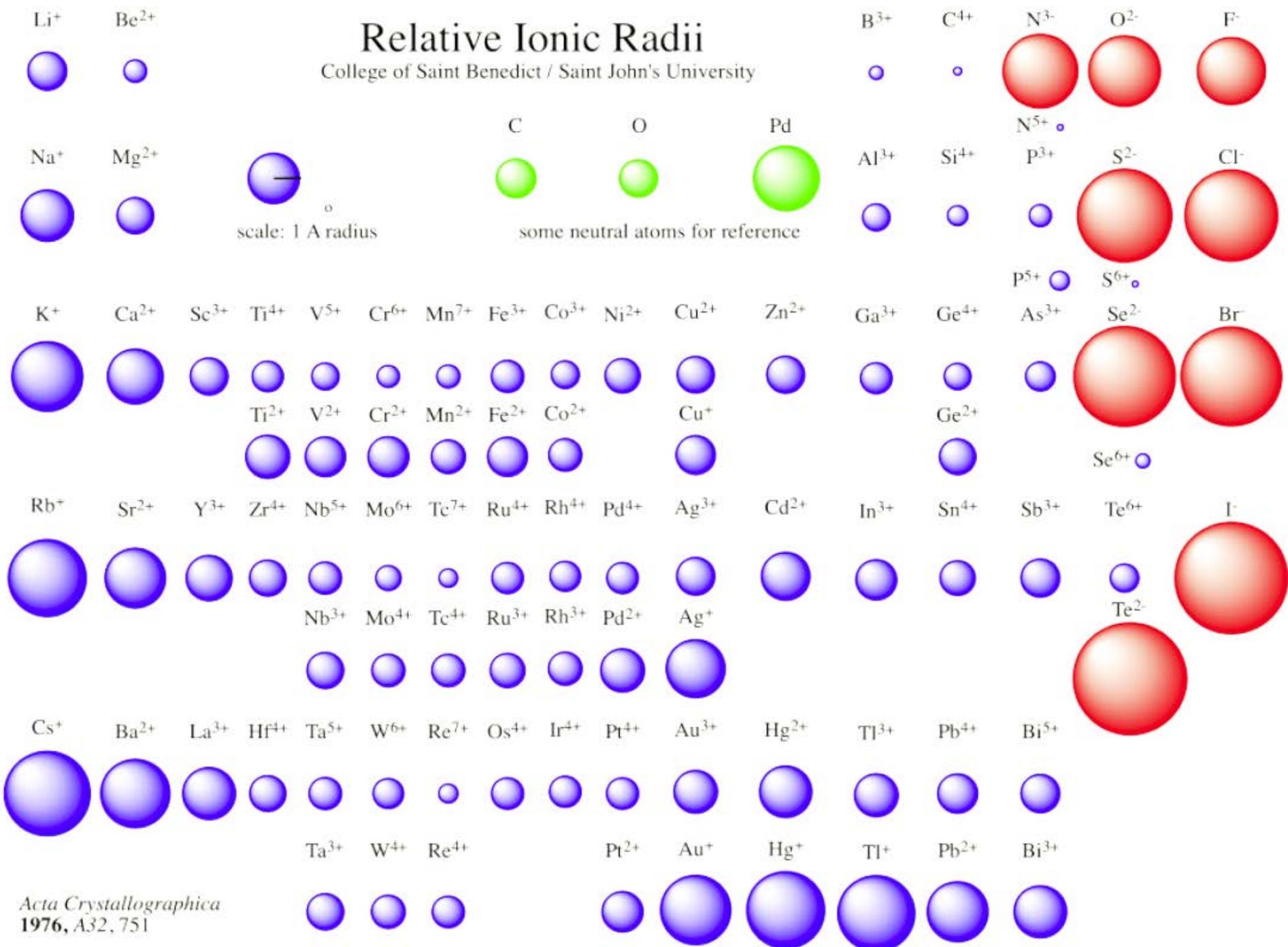
gestattet Aussagen über das geochemische Verhalten der Ionen

# Ionenradius



# Relative Ionic Radii

College of Saint Benedict / Saint John's University



# Radienquotienten & Koordinationszahl

C.N. of cation

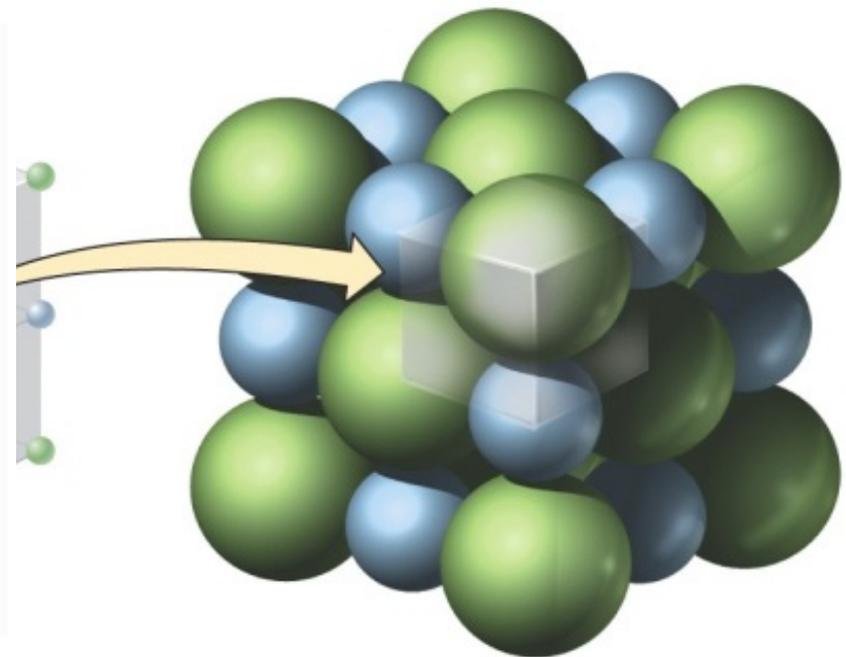
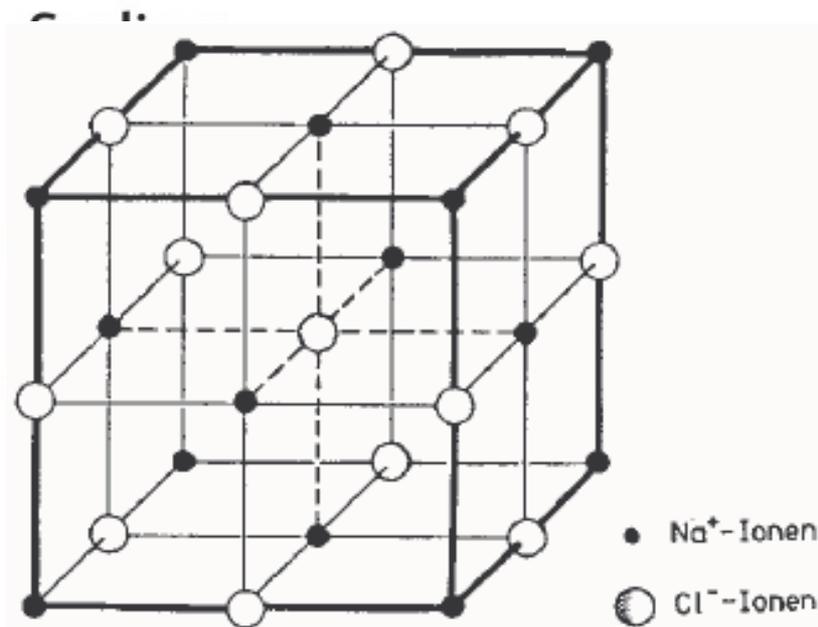
- 8 (cubic)
- 6 (octahedral)
- 4 (tetrahedral)
- 3 (triangular)

$r^+/r^-$  range

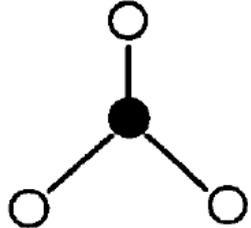
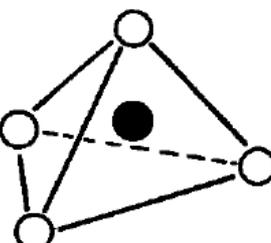
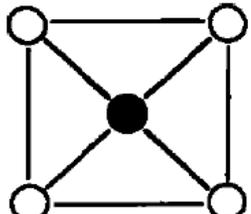
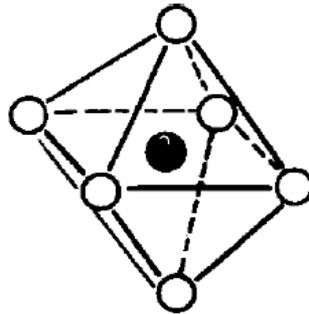
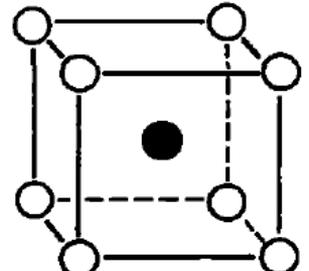
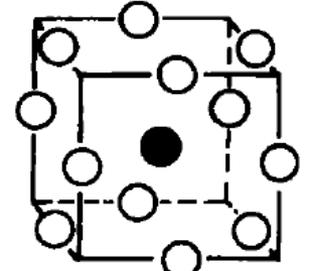
- $\geq 0.732$
- 0.414 – 0.732
- 0.225 – 0.414
- 0.155 – 0.225

possible structures

- CsCl, CaF<sub>2</sub>
- NaCl, TiO<sub>2</sub>, CdCl<sub>2</sub>
- antifluorite, ZnS



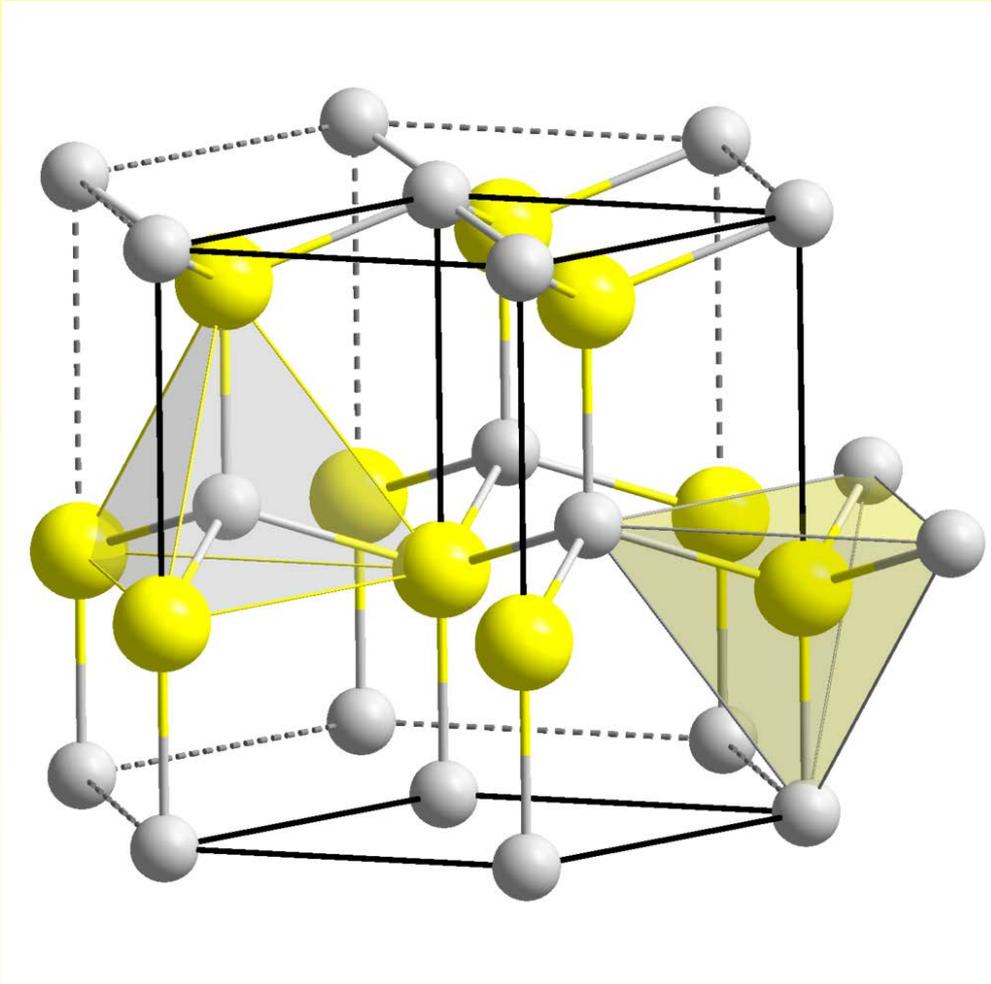
Berechnen Sie mit Hilfe der beigefügten Abbildung (oder einer Tabelle) die Radien-quotienten von **RbBr**, **BeO**, **SrS**, **CaCl<sub>2</sub>**, **BeF<sub>2</sub>**, **SrF<sub>2</sub>** und ordnen Sie sie einen der folgenden Gittertypen zu.

Radius ratio	Coordination	Arrangement of ions	Coordination	Arrangement of ions
<0.155	2		Linear	
0.155–0.225	3		Trigonal planar	
0.225–0.414	4		Tetrahedral	
0.414–0.732	4		Square planar	
0.414–0.732	6		Octahedral	
0.732–1.00	8		Body-centered cubic	
>1.00	12		Edge-centered cubic	

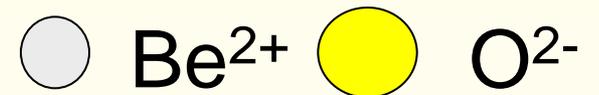
● Cation, ○ Anion

# BeO – Berylliumoxid

## *Hexagonal (Wurzitstruktur)*

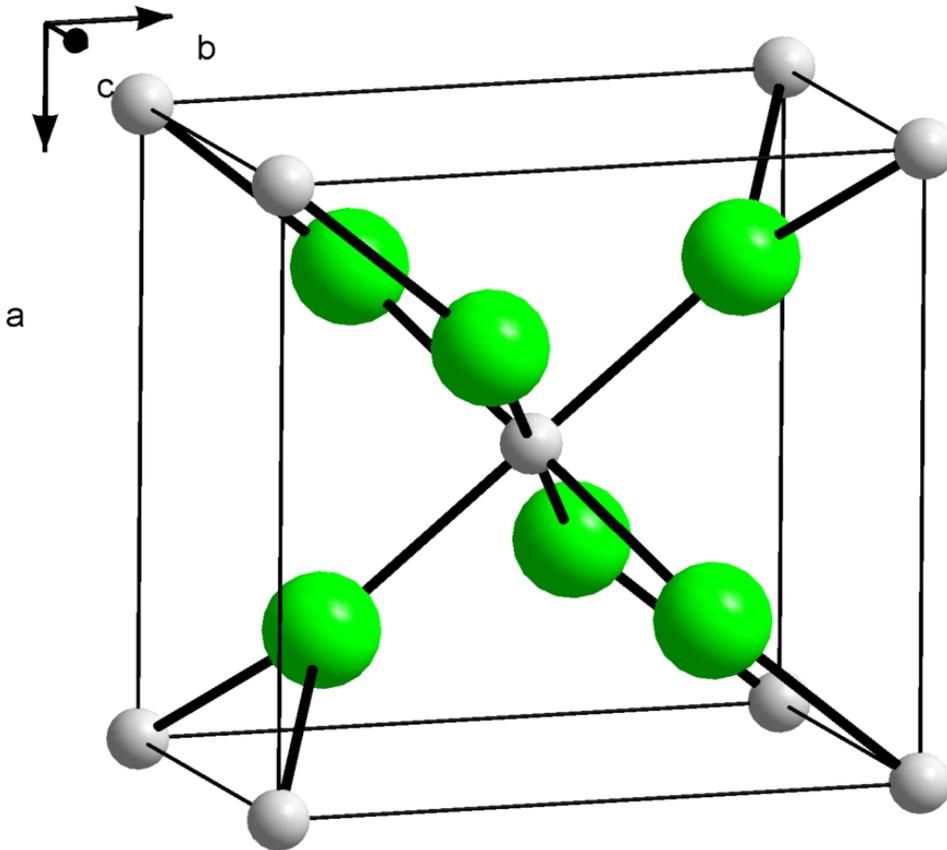


$$R_{c/a} = 0.34$$

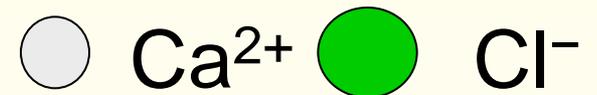


# CaCl<sub>2</sub> – Calciumchlorid

*orthorhombisch (deformierte Rutilstruktur)*

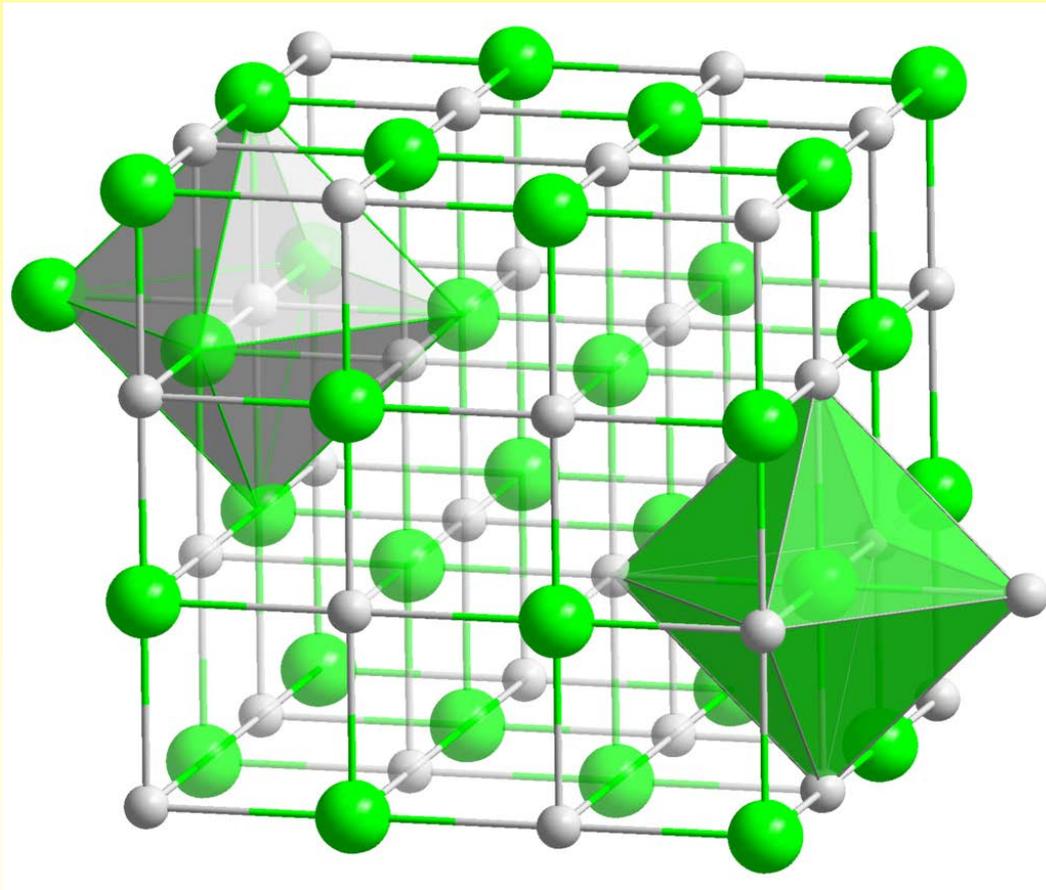


$$R_{c/a} = 0.68$$

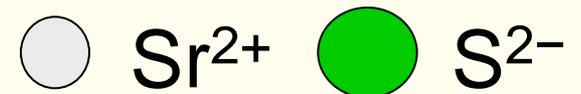


# SrS – Strontiumsulfid

*Kubisch (Natriumchloridstruktur)*

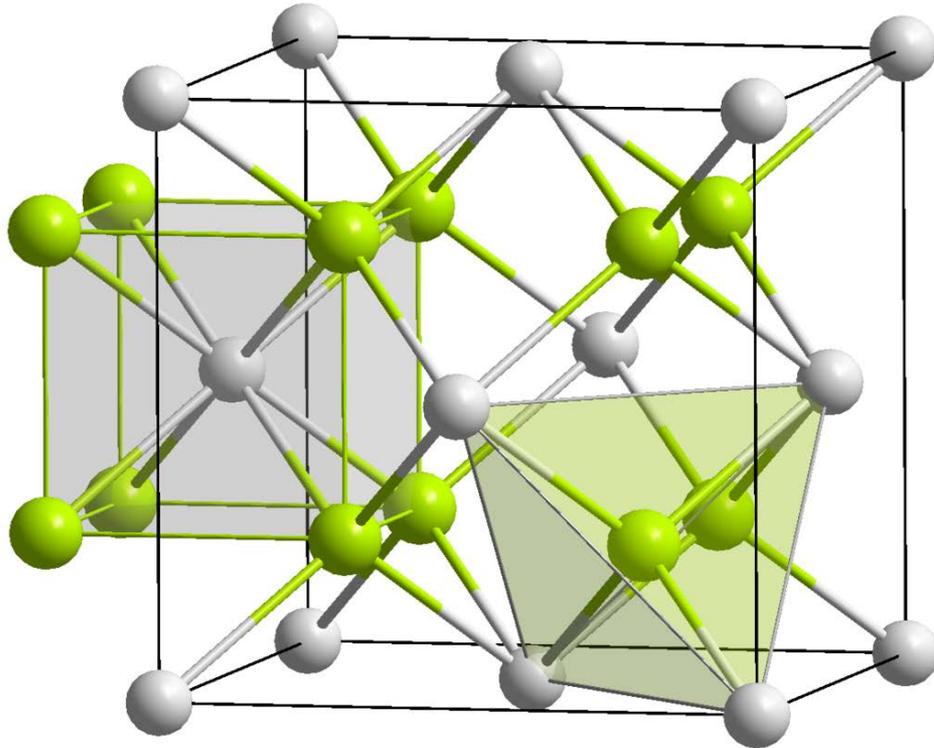


$$R_{c/a} = 0.703$$

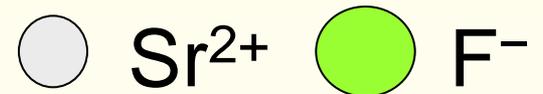


# SrF<sub>2</sub> – Strontiumfluorid

*Kubisch (Calciumfluoridstruktur)*

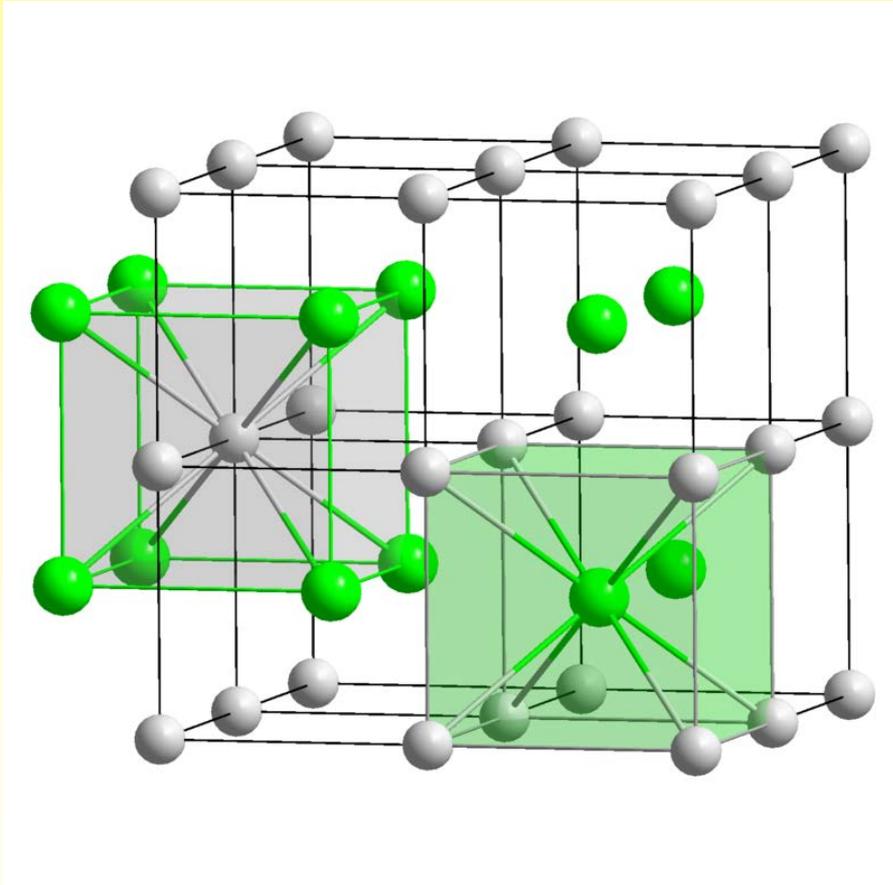


$$R_{c/a} = 0.97$$



# RbBr – Rubidiumbromid

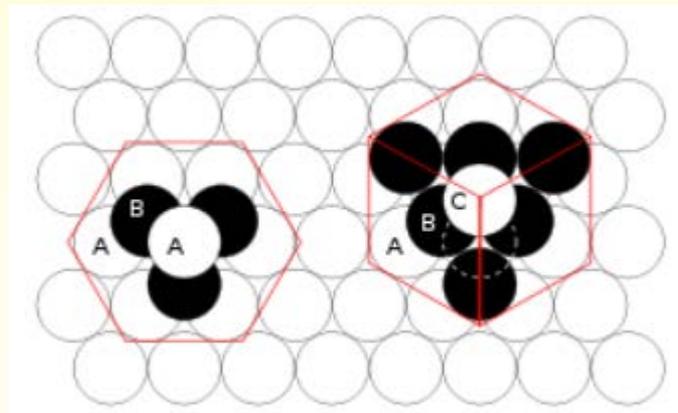
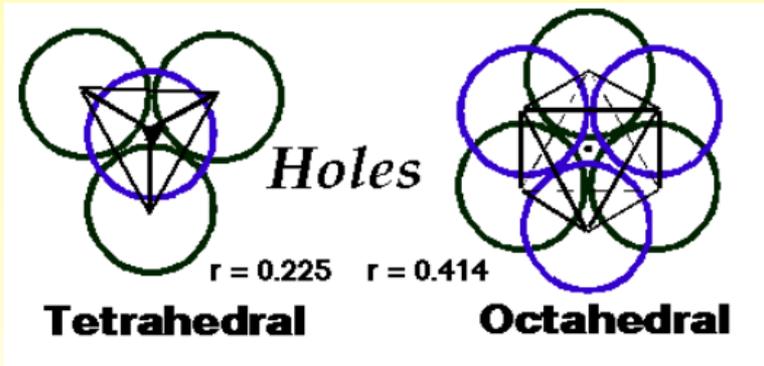
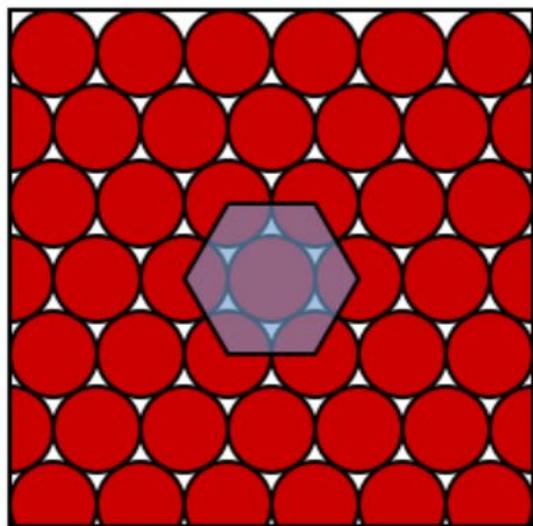
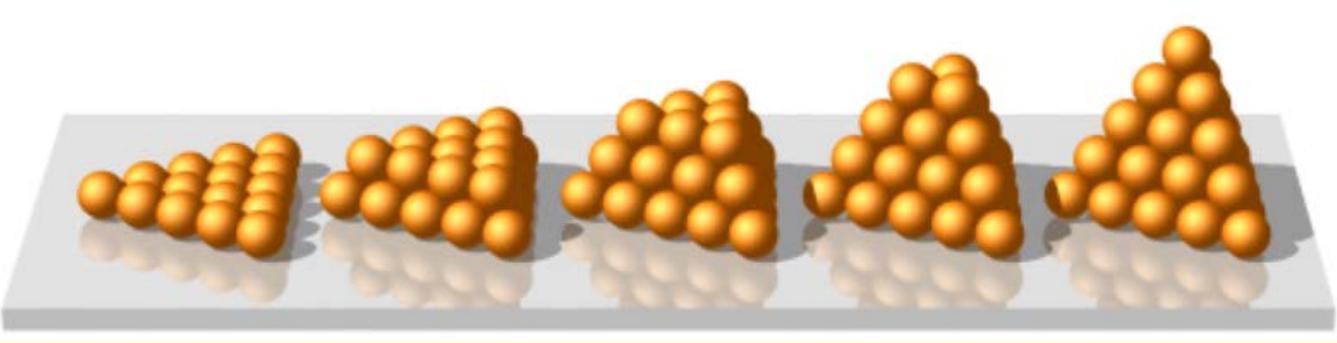
## *Kubisch (Cäsiumchloridstruktur)*



$$R_{c/a} = 0.91$$



# Ionengitter - Ionenkristalle

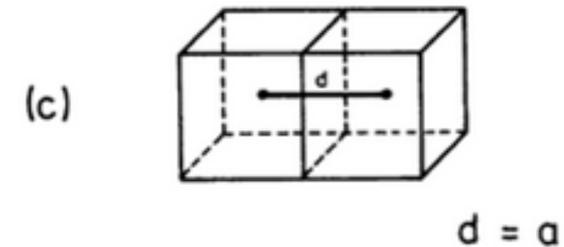
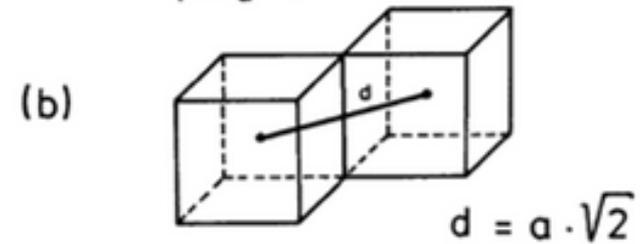
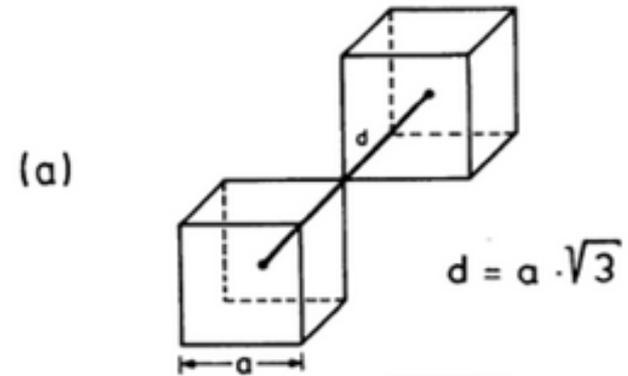
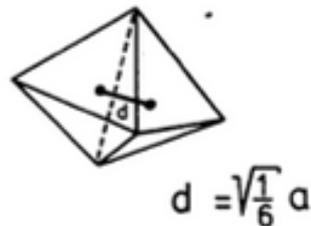
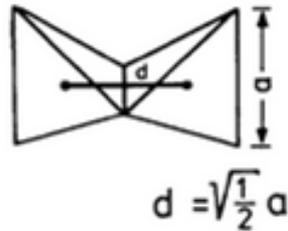
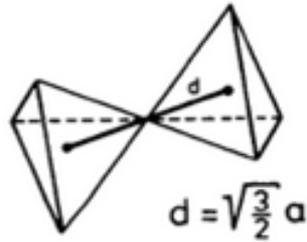


ABA = hexagonal dichteste Packung

ABC = kubisch dichteste Packung

# Verknüpfung von Koordinationspolyedern

Beispiel:  
 $\text{SiO}_4$ -Tetraeder



# Elemente und Verbindungen

- **Element:** *a substance that cannot be decomposed into simpler substances by chemical means*
  - although possible by nuclear / high energy processes.
  - e.g. Potassium (K), we cannot have  $K \rightarrow X + Y$
- **Compound:** *A substance of two or more elements in fixed proportions. Compounds can be decomposed into their constituent elements*
  - $2\text{H}_2\text{O} \Rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$  ( $\text{H}_2 \Rightarrow 2\text{H}$ ,  $\text{O}_2 \Rightarrow 2\text{O}$ )
  - Minerals are compounds
- **Mixture:** *A sample of matter composed of two or more substances (compounds or elements), each of which retains its identity and properties.*
  - rock, water, soil, air...

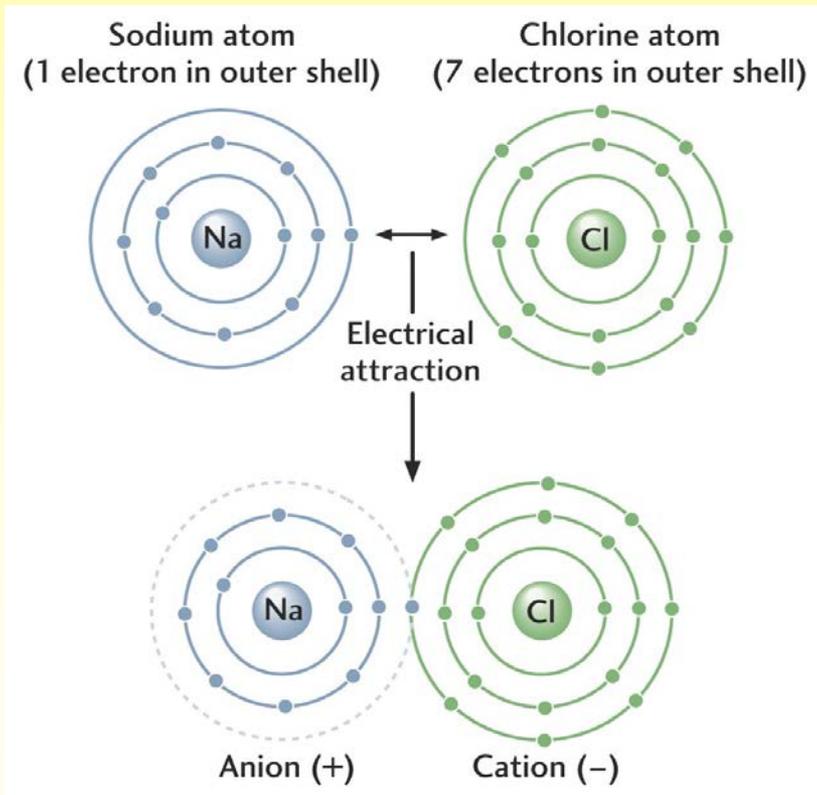
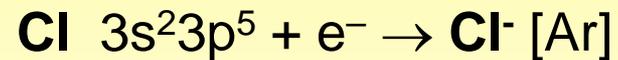
# Chemische Bindungen

**Ionenbindung (heteropolare Bindung)** zwischen Alkalimetallen und Elementen, die rechts im PSE stehen, den Nichtmetallen.

Natriumchlorid klassischer Fall der Ionenbindung

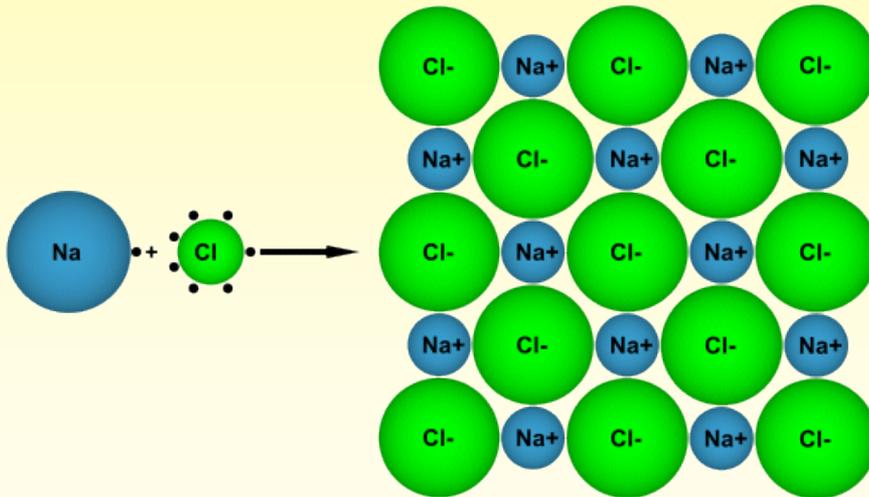
Na:  $e^-$  Donator (wird zu Kation), Nichtmetall (z.B. Cl)  $e^-$  Akzeptor (wird zu Anion)

Die Ionenbindung ist elektrostatischer Natur aber nicht orientiert bzw. nicht gerichtet



# Ionenbindung

Elektrisch positiv und negativ geladene Ionen ziehen sich an - werden durch elektrostatische Anziehungskräfte (Coulomb-Kräfte) zusammengehalten. Die elektrostatischen Kräfte wirken in alle Richtungen.

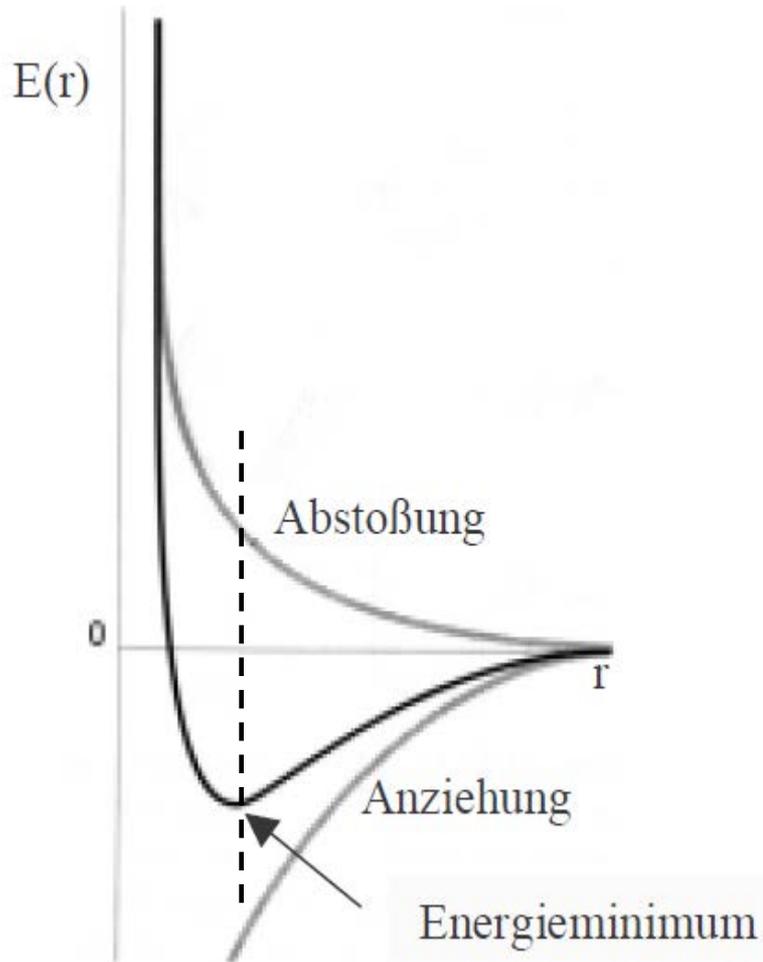


$$F = \frac{e_1 e_2}{r^2}$$

$F$  = Anziehungskraft  
 $e_1, e_2$  = Ladungen  
(*entgegengesetzt*)  
 $r$  = Abstand zwischen Ionenmittelpunkten

**Gitterenergie (-enthalpie):** die bei der Vereinigung der beiden Ionenarten freiwerdende Energie

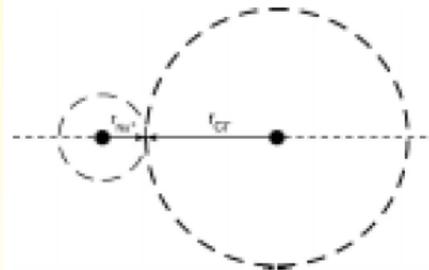
# Chem. Bindungen - Gleichgewichtsabstand



**Anziehung** durch Colombkraft;

**Abstoßung** durch Überlappung der Elektronenhüllen.

Der **Gleichgewichtsabstand** zweier Ionen befindet sich im Energieminimum. Dort gilt: anziehende Kraft = abstoßenden Kraft

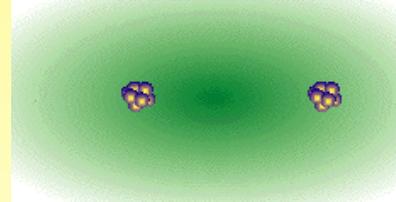


$$r_{\text{Na}^+} = 95 \text{ pm}, r_{\text{Cl}^-} = 184 \text{ pm}, r = r_{\text{Na}^+} + r_{\text{Cl}^-}$$

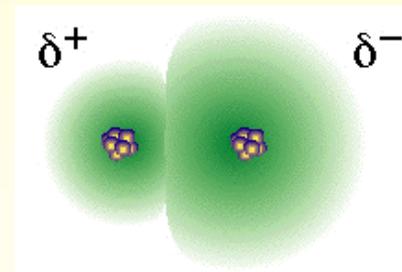
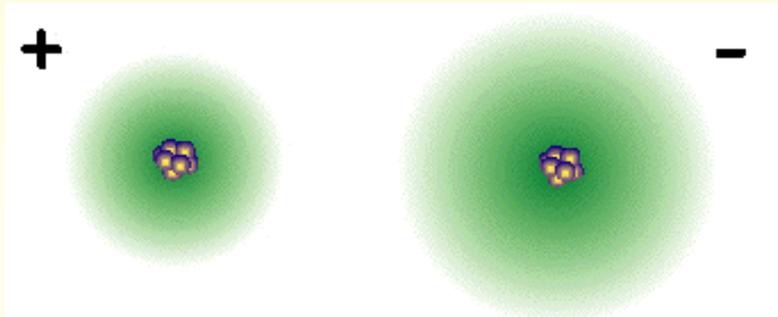
Einheiten :  $100 \text{ pm} = 1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$

# Kovalente Bindung

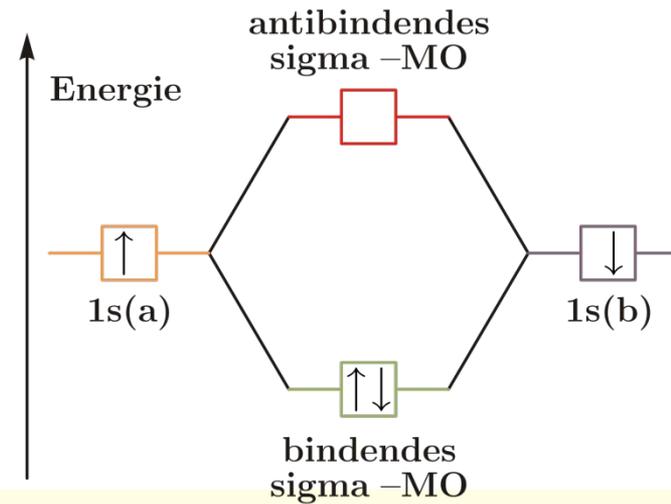
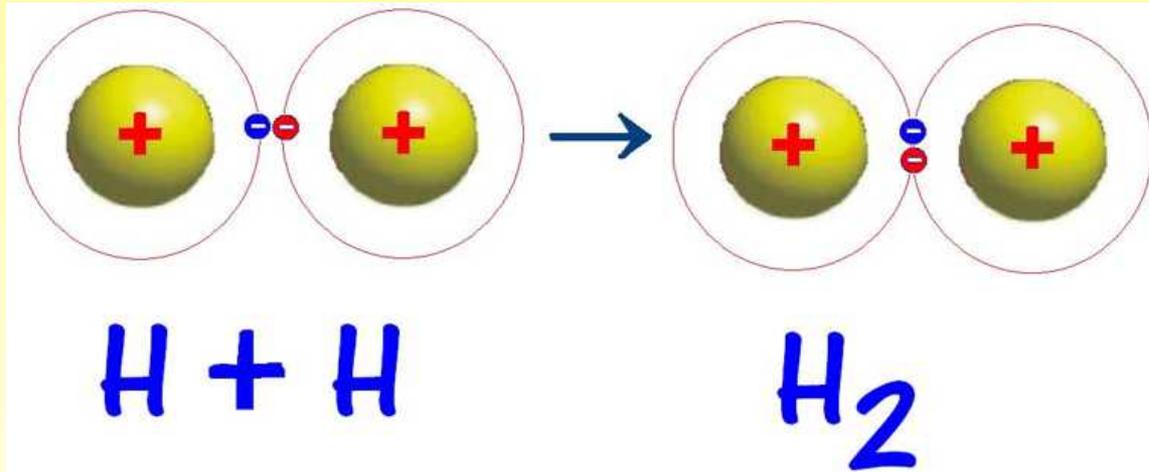
- Alternative zur Ionenbindung oder Elektronentransfer-Bindung. In einer idealen **kovalenten Bindung** werden zwei Valenzelektronen zwischen zwei Atomen gleichmäßig aufgeteilt
- Reine kovalente Bindungen nur bei Verbindungen gleicher Atome z.B.  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$



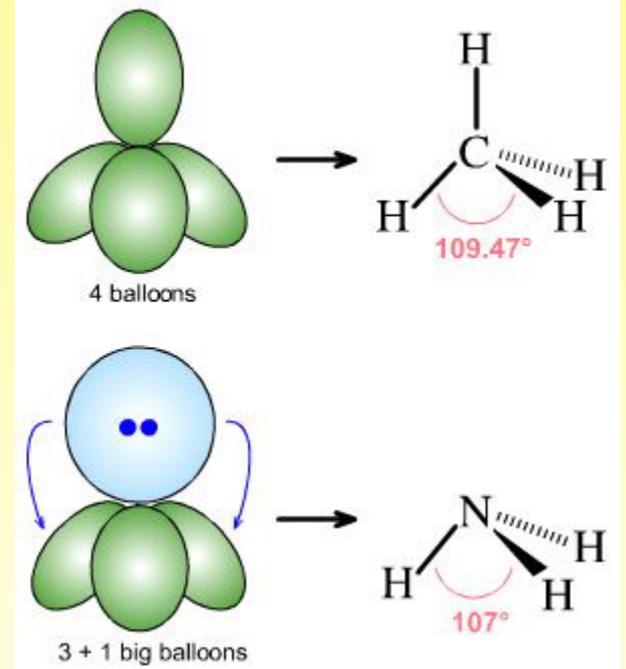
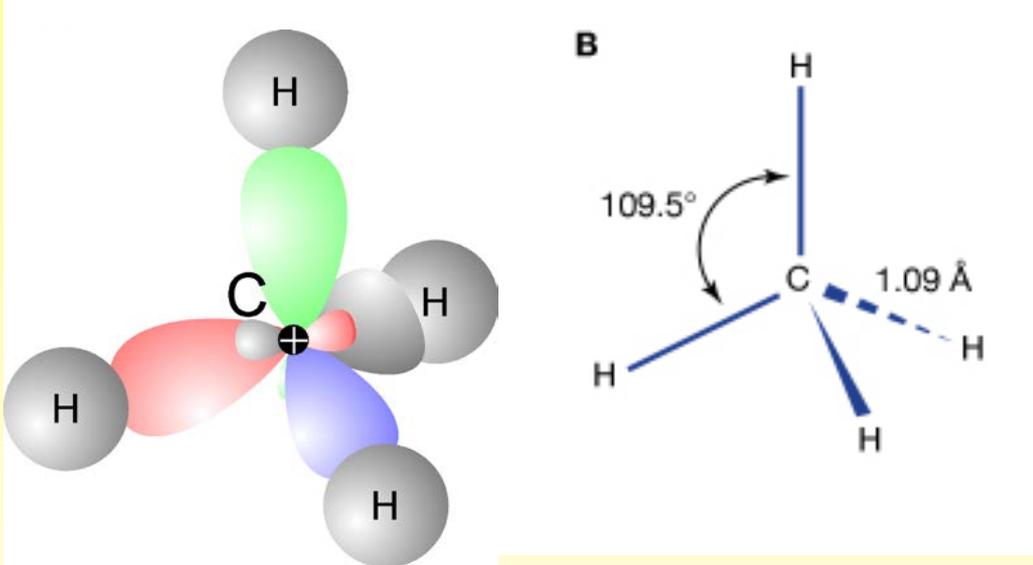
- Atome unterschiedlicher Elemente teilen Elektronen nicht vollständig miteinander. Elektronenwolke nicht symmetrisch verteilt und es tritt eine gewisse Polarisierung auf (kovalente Bindung ist orientiert bzw. gerichtet).



# Kovalente Bindung

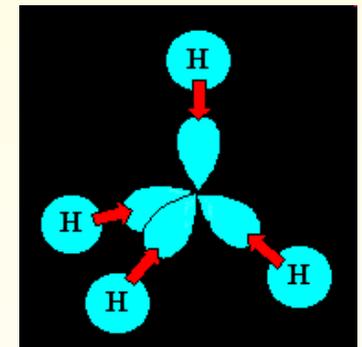
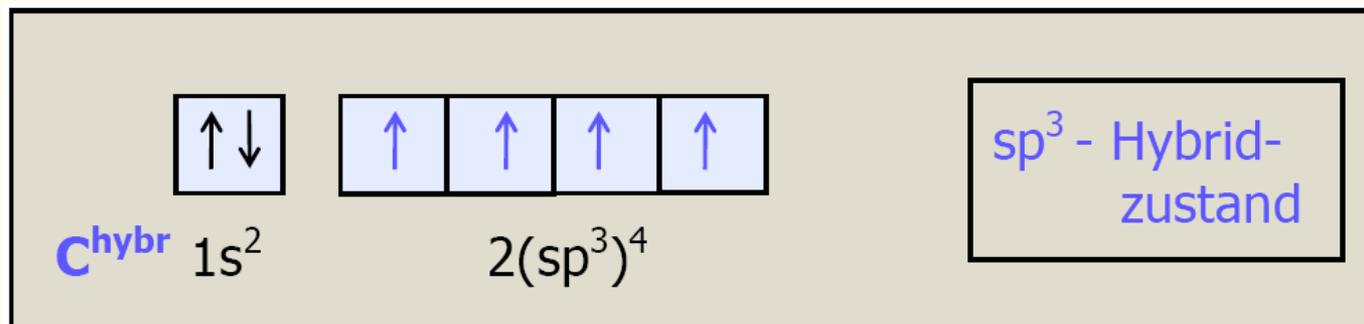
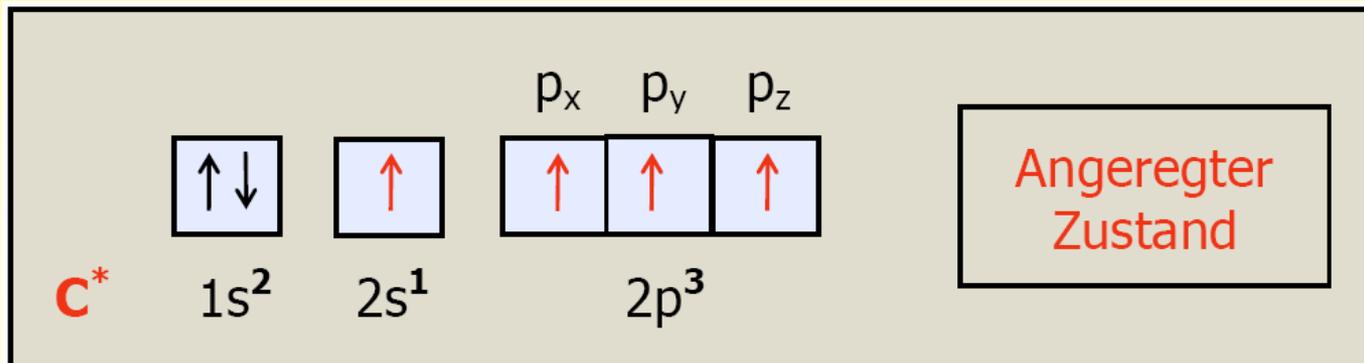
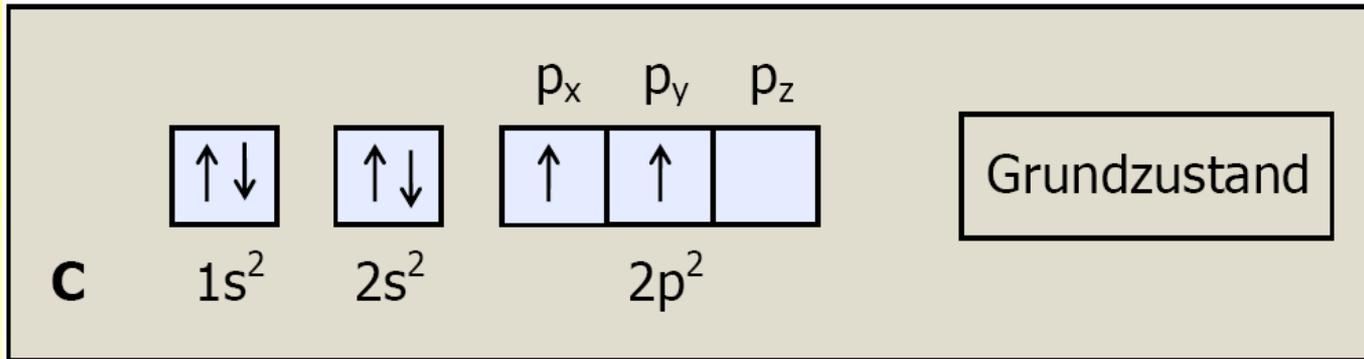


# Kovalente Bindung

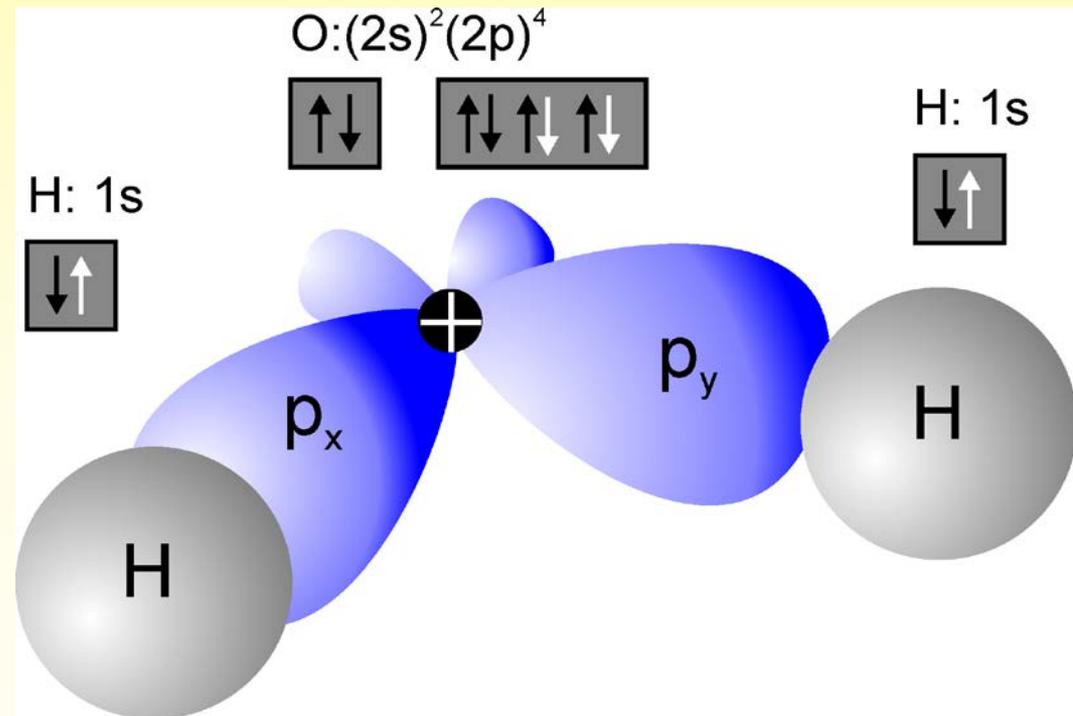
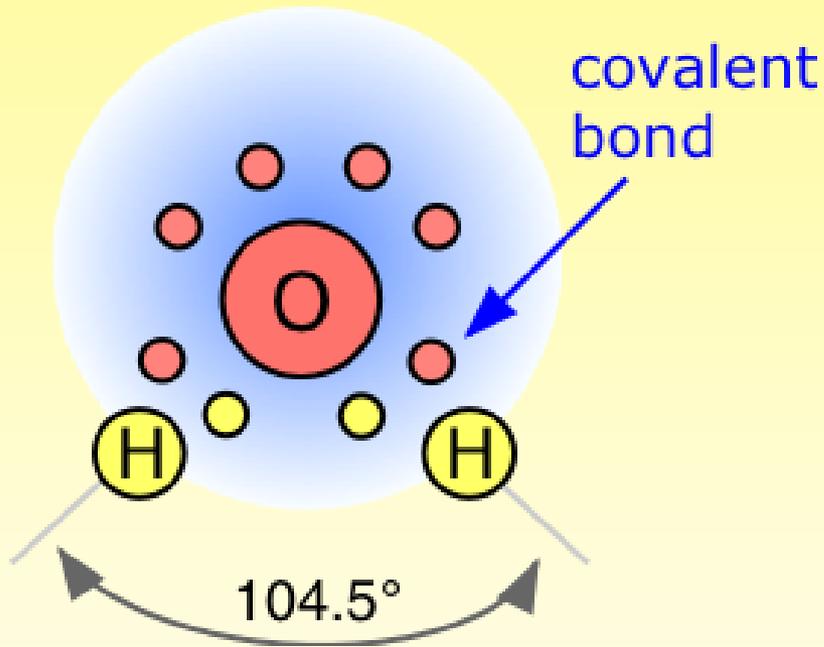


# Vierbindigkeit des Kohlenstoffs

## Methanbindung – $sp^3$ Hybridisierung



# Kovalente Bindung - Wassermolekül

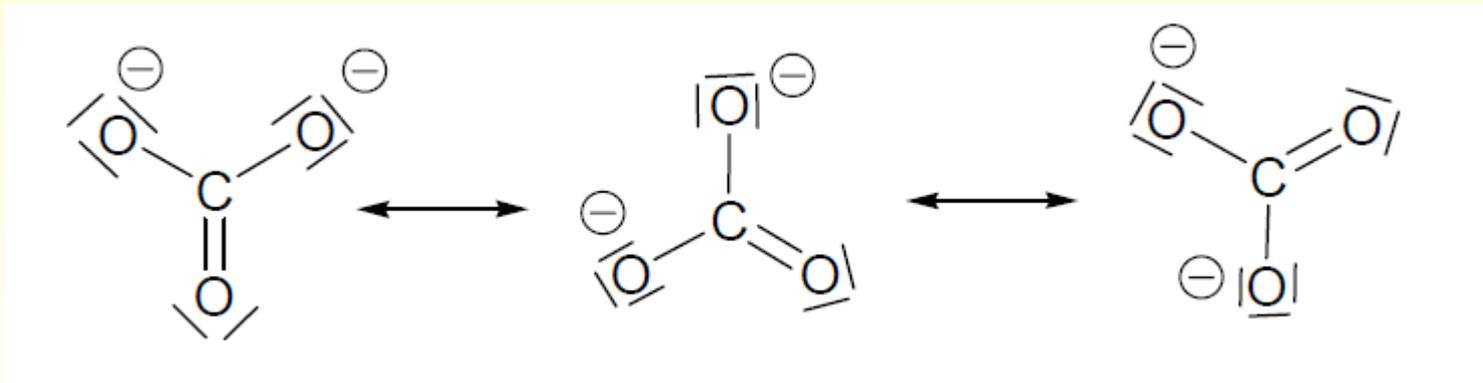


# Koordinative Bindung

Bei **kovalenter Bindung** steuert jeder Bindungspartner ein Elektron zum Bindungs-Elektronenpaar bei. Für die **koordinative Bindung** werden beide Elektronen von einem Bindungspartner geliefert.

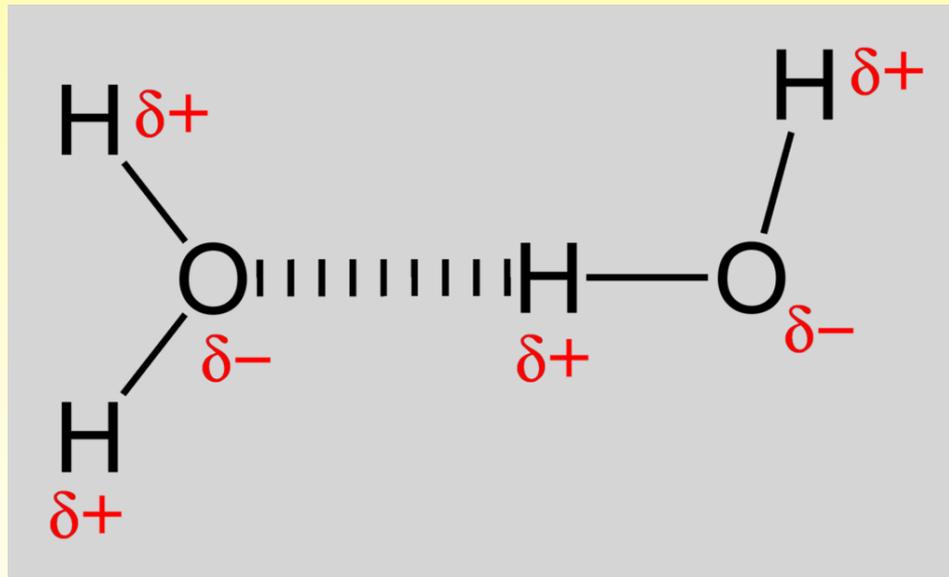
Carbonat-Ion  $\text{CO}_3^{2-}$

Die drei C-O-Bindungen sind gleichwertig und ununterscheidbar (mesomerer Zustand bzw. delokalisiertes System)



# Wasserstoffbrückenbindung

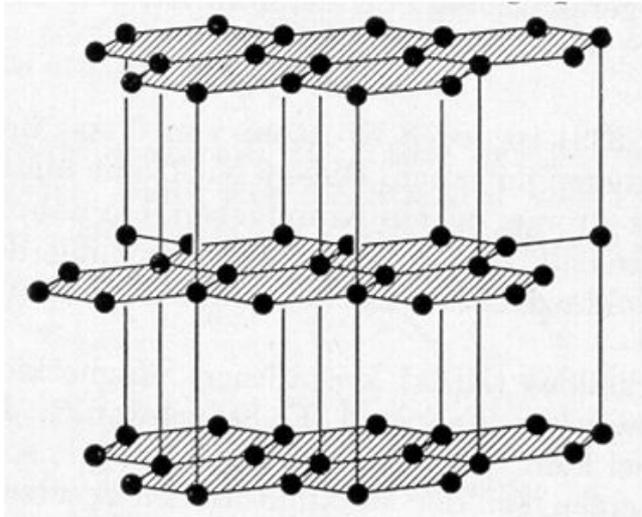
treten auf zwischen Molekülen die ständig einen positiven und einen negativen Pol besitzen  
(permanente **Dipole**)



Ein Molekül mit Dipol kann auch eine Polarisation induzieren  $\rightarrow$  induzierte Dipol (**van der Waals**)  
Wechselwirkungen (Graphitschichten)

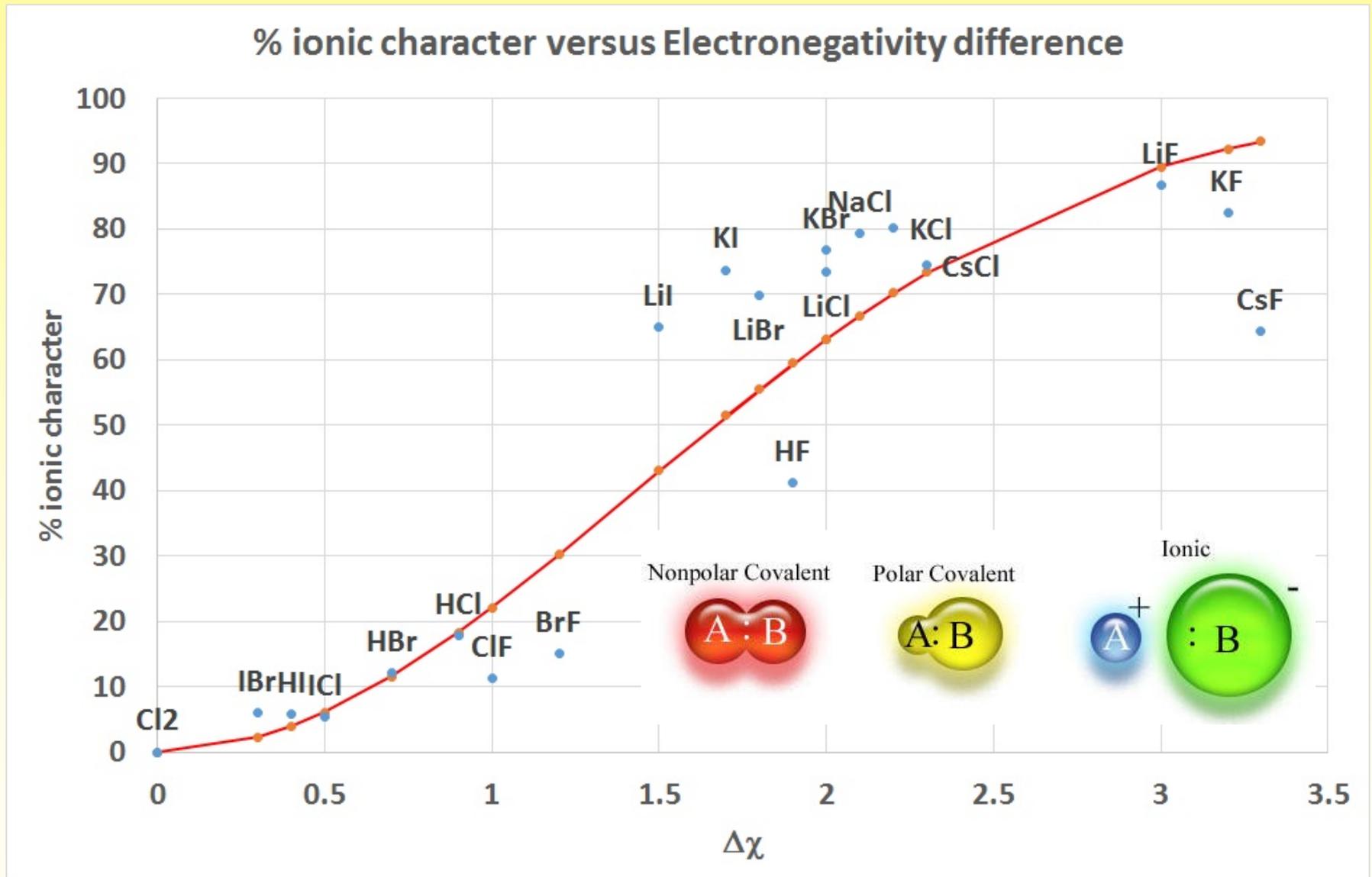
# van der Waals Kräfte

## Graphit

Gittertyp	Aufbau	Substanzen
Graphit-Gitter		Graphit, C, ( $sp^2$ Hybridisierung)

- Graphit mit kovalenter Bindung innerhalb der Schichten und van der Waals Bindung zwischen den Schichten

# Ionenbindung vs. kovalente Bindung



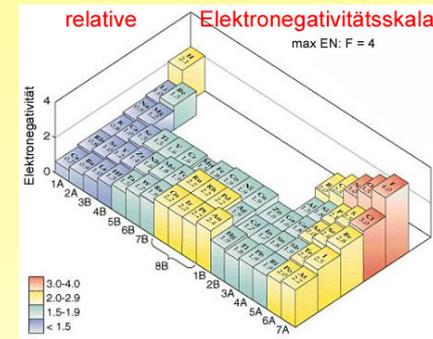
# Ionenbindung vs. kovalente Bindung

*Wieso ist der Bindungstyp wichtig?*

**Beispiel: Lösung von Calcit,  $\text{CaCO}_3$ :**

**Hat Einfluß auf  $\text{CO}_2$ -Kreislauf und Treibhauseffekt**

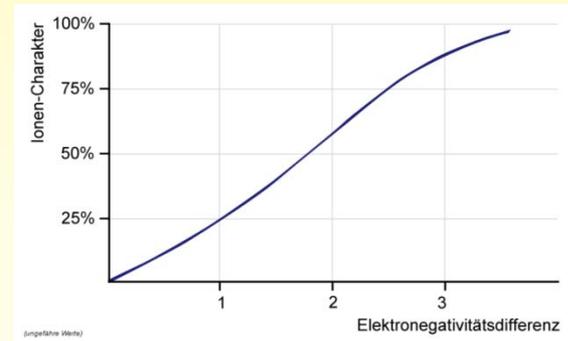
prizipiell zwei Möglichkeiten:



C–O Bindung sind stark covalent  $\Delta_{\text{Elektronegativität}} = 3.5 - 2.5 = 1$  (c. 20% ionisch)

Bindungen lösen sich **nicht** in  $\text{H}_2\text{O}$ .

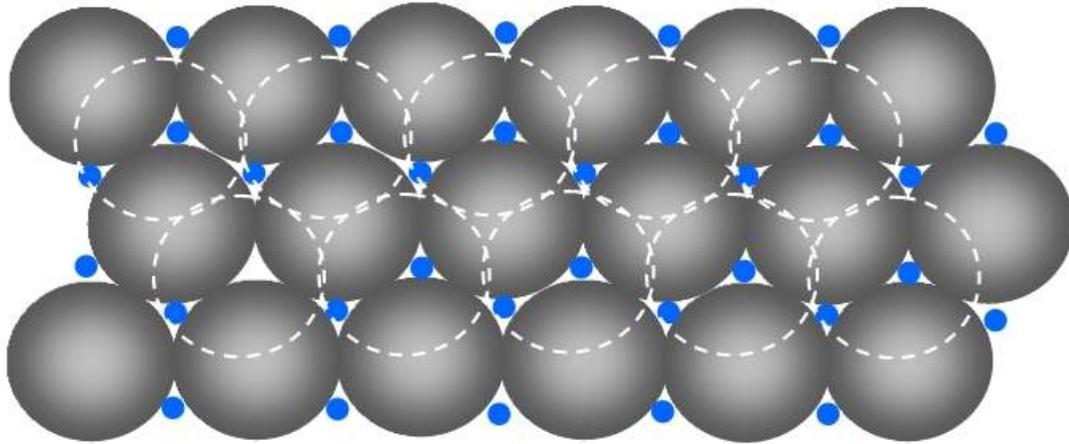
erst bei Temperaturen  $>900^\circ\text{C}$  zerfällt das  
Karbonation



Ca– $\text{CO}_3$  Bindung ist stark ionisch

Eigenschaft: ionische Bindungen lösen sich in einem polaren  
Lösungsmittel wie Wasser (Ionenbindung – beruht auf elektrostatischen  
Anziehungskräften - bricht zusammen)

# Metallbindung



## Metallgitter

- Elektronen
-  Metallatomrümpfe
-  Metallatomrümpfe einer anderen Ebene

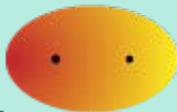
Die meisten Metalle der Hauptgruppen besitzen nur 1 bis 3 Außenelektronen. Diese können leicht abgegeben werden. Dadurch entstehen positiv geladene Metallionen und frei bewegliche Elektronen. Diese Elektronen ermöglichen die gute elektrische Leitfähigkeit und die hohe Wärmeleitfähigkeit der Metalle

# Übersicht – chemische Bindungen

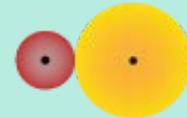
## chemische Bindung

starke Bindungen  
100-500 kJ/mol

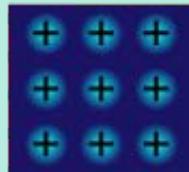
Atombindung  
kovalente Bindung



Ionenbindung

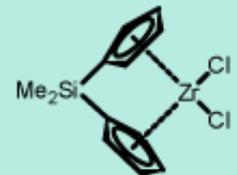


Metallbindung



schwache Bindungen  
<100 kJ/mol

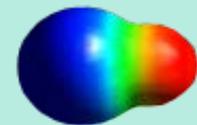
koordinative Bindungen, z.B.  
Komplexbindung  
Nebervalenzbindung



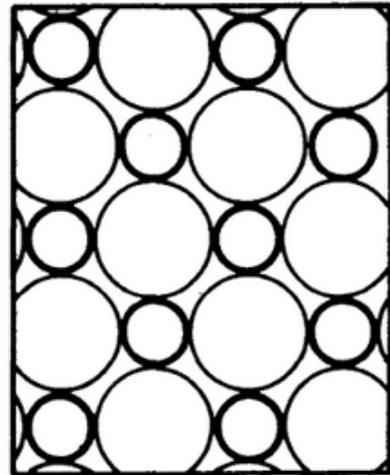
Wasserstoff-Brückenbindung



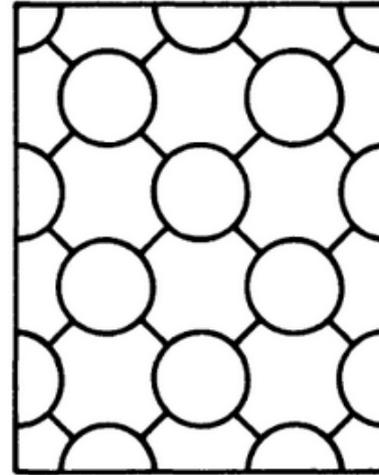
zwischenmolekulare Wechselwirkung, z.B.  
Van-der-Waals-Kräfte



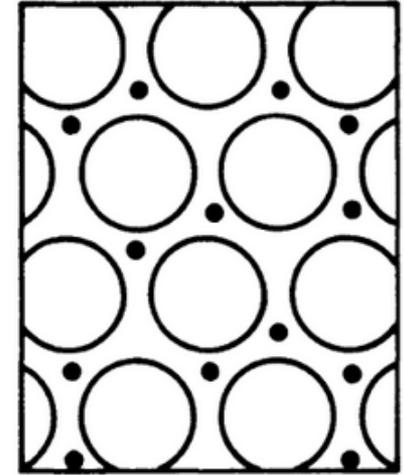
# Übersicht – chemische Bindungen



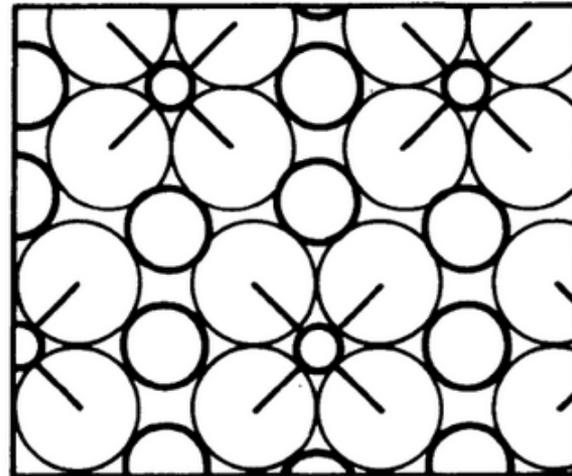
**a**



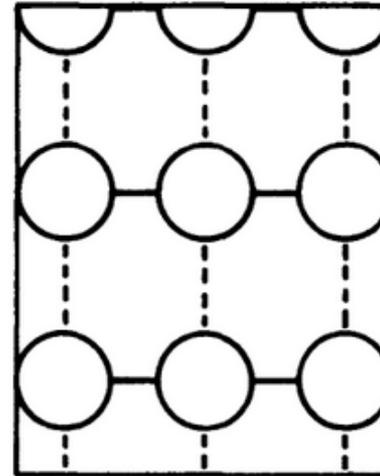
**b**



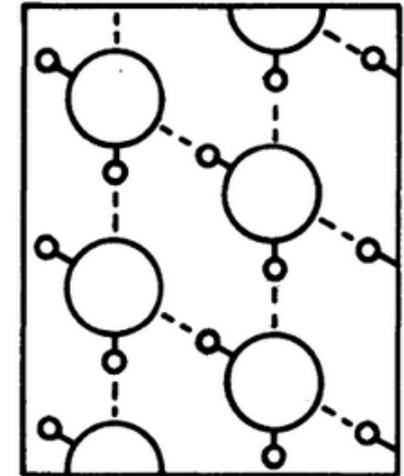
**c**



**d**



**e**



**f**

Heidelberger Taschenbücher

Möller

Anorganische  
Geochemie

Eine Einführung



Springer-Verlag  
Berlin Heidelberg New York Tokyo

# Chemische Bindungen

## **1) Ionenbindung:**

Transfer eines Elektrons von einem Atom zum anderen (Bsp.: NaCl)

## **2) Kovalente Bindung:**

Äußere Elektronen des Atoms befinden sich in einer Hybrid-Orbitale, die beide Atome einschließt (Bsp.: H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>)

## **3) Metallbindung:**

Valenzelektronen sind nicht mit einem einzelnen Atom assoziiert, sondern sie sind mobil und können an jeder beliebigen Stelle im Kristallgitter sein

## **4) Van der Waals-Kräfte:**

Asymmetrische Verteilung von Ladung im Molekül

## **5) Wasserstoffbrückenbindung:**

Zwischen H und stark elektronegativen Atomen

# Hydratation von Ionen

Kleinere Ionen ( $\text{Li}^+$ ) binden mehr Wassermoleküle als größere ( $\text{K}^+$ ) und sind damit in hydratisierter Form größer.

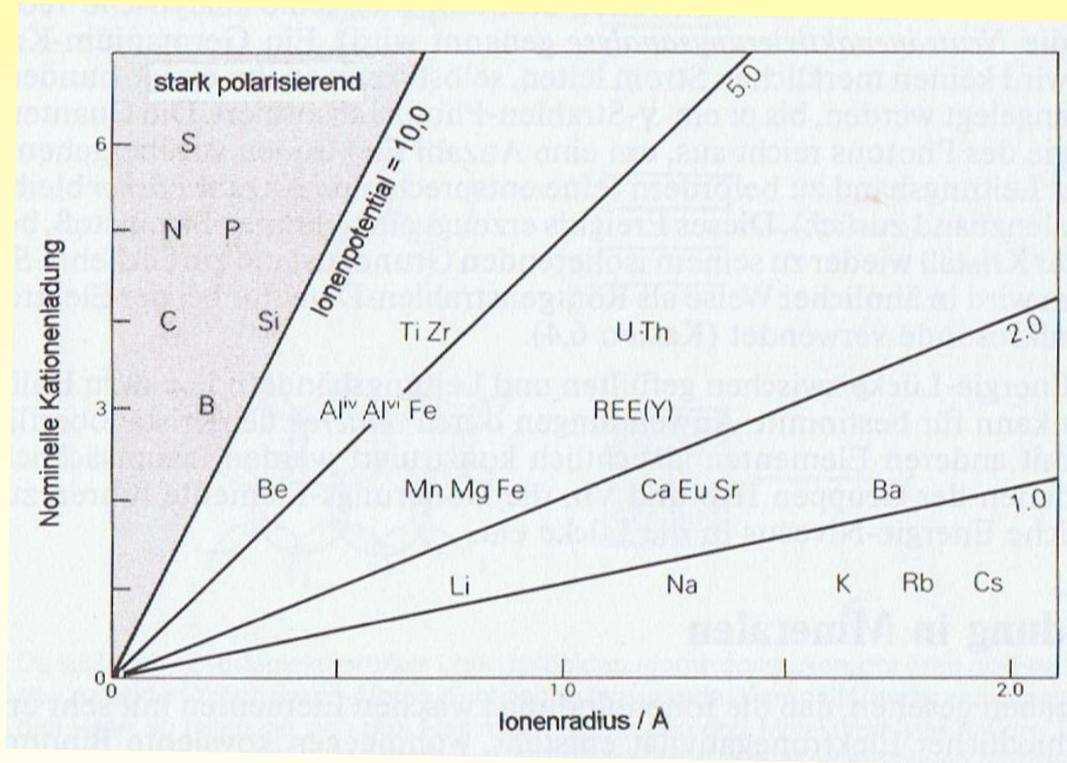
Ionenradius ohne Hydrathülle:  $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{K}^+$   
Radius der hydratisierten Ionen:  $\text{Li}^+_{\text{aq}} > \text{Na}^+_{\text{aq}} > \text{K}^+_{\text{aq}}$

- Hydratation abhängig vom Ionenpotential
- Aus der Hydratation resultiert ein größerer effektiver Ionenradius
- Ionenradius beeinflusst Diffusionsgeschwindigkeit und den Transport von Ionen



# Polarisierbarkeit von Anionen

Hoch geladenen Ionen (HFSEs) sind stark polarisierend



# Hydratation von Ionen

Kleinere Ionen ( $\text{Li}^+$ ) binden mehr Wassermoleküle als größere ( $\text{K}^+$ ) und sind damit in hydratisierter Form größer.

Ionenradius ohne Hydrathülle:  $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{K}^+$   
Radius der hydratisierten Ionen:  $\text{Li}^+_{\text{aq}} > \text{Na}^+_{\text{aq}} > \text{K}^+_{\text{aq}}$

- Hydratation abhängig vom Ionenpotential
- Aus der Hydratation resultiert ein größerer effektiver Ionenradius
- Ionenradius beeinflusst Diffusionsgeschwindigkeit und den Transport von Ionen





# Elemente und Nuklide

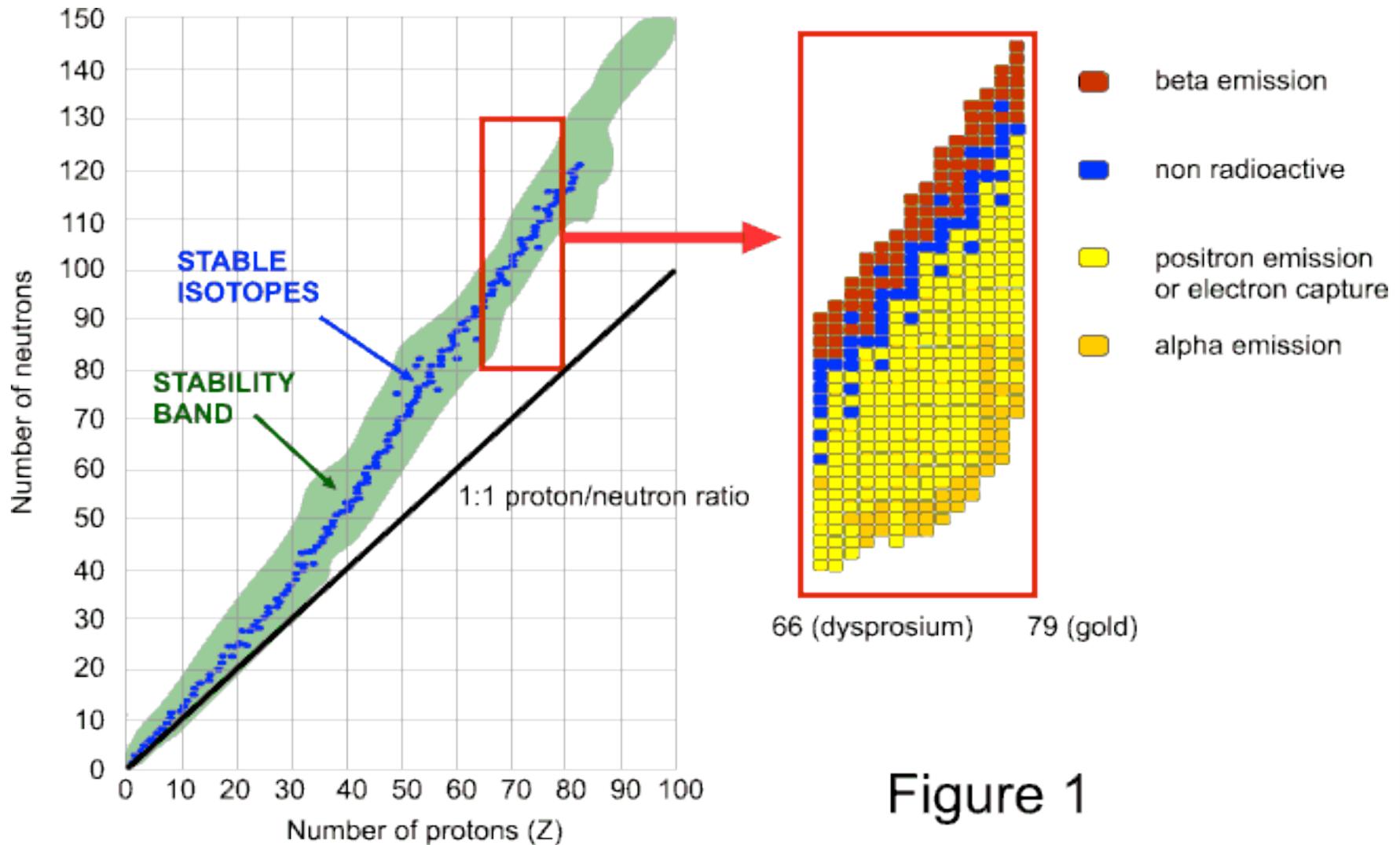
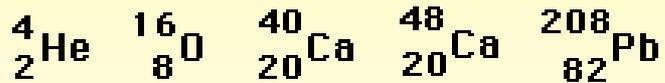
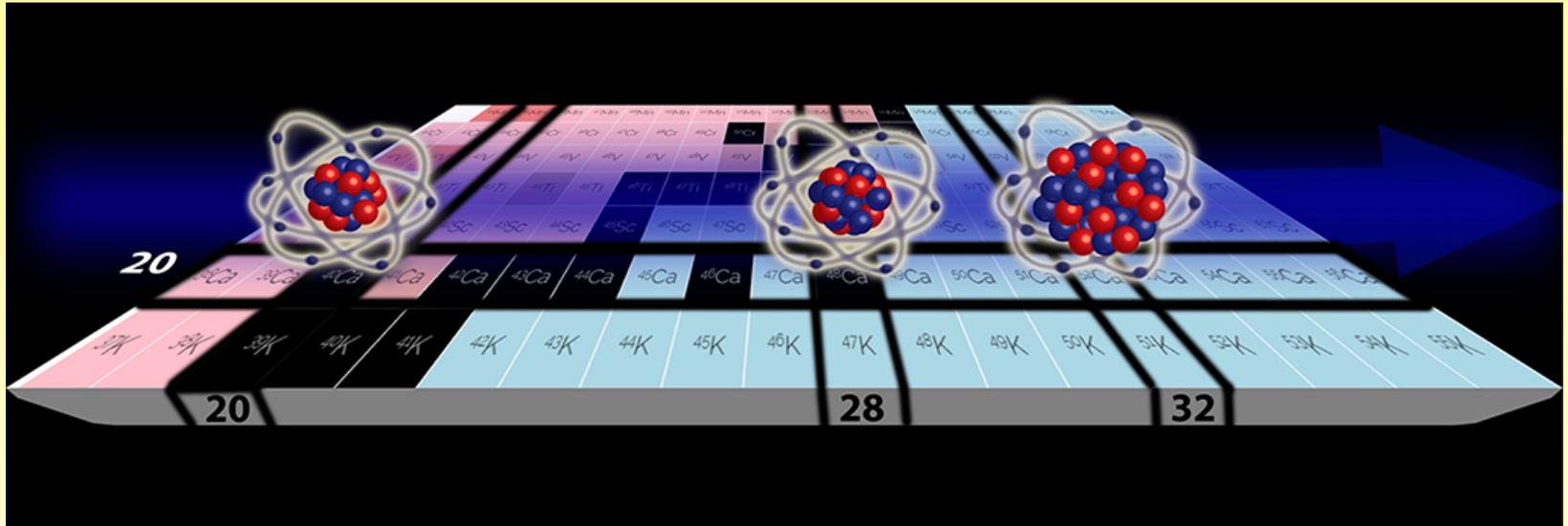


Figure 1

# Magische Zahlen

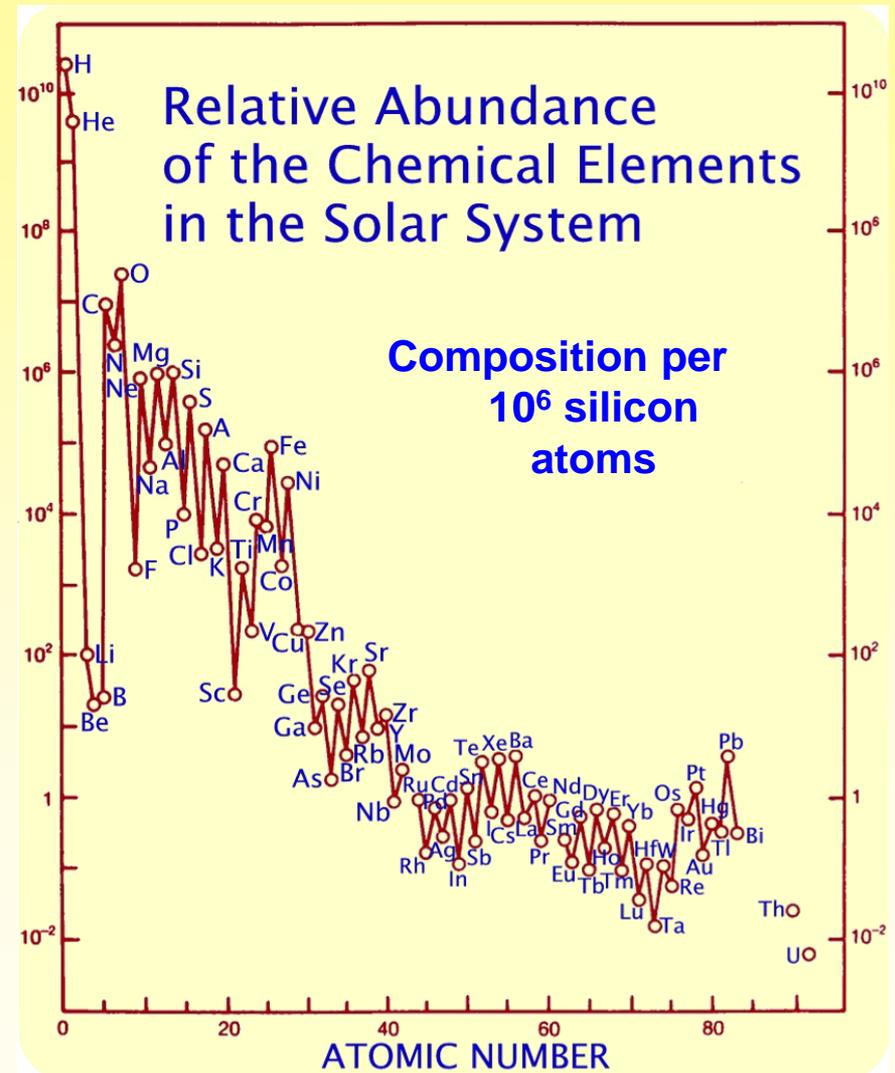


2, 8, 20, 28, 50, 82, 126

Maria Goeppert-Mayer  
Schalenmodell der Kernphysik  
Nobelpreis 1963

# Häufigkeit der Elemente im Sonnensystem

- H & He are the two most abundant elements in the solar system >99%.  
(H/He = 12.5)
- Li, Be, B are highly depleted
- The first 50 elements show an ~exponential decrease in abundance, with a separate peak about Fe
- The abundances of elements  $Z > 50$  are very low and broadly constant
- Elements with odd  $Z$  are less abundant than those with even  $Z$  (Oddo-Harkins rule)



# Nukleosynthese



„Chemie“ des  
Universums,  
Kosmochemie

Spektralanalyse

Himmelsboten  
(Meteorite)

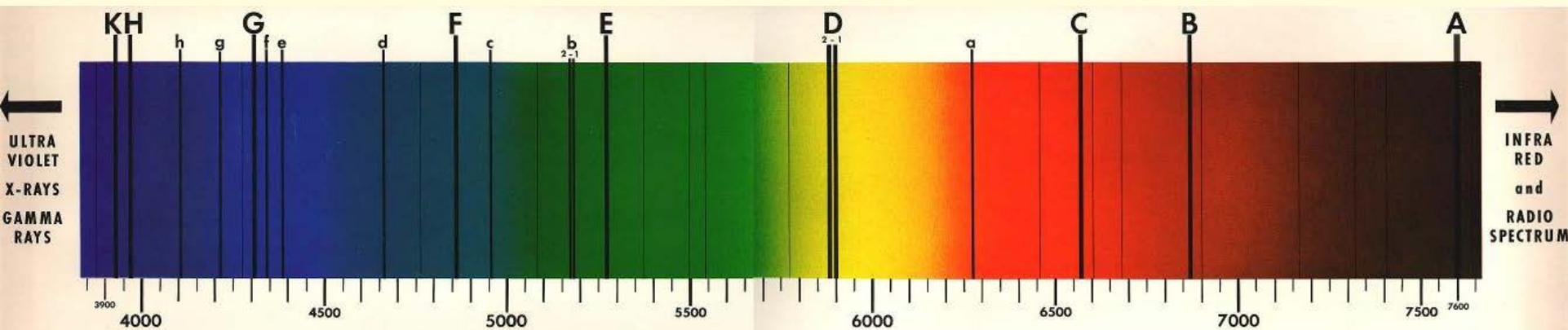


# Zusammensetzung (Chemie) der Sonne

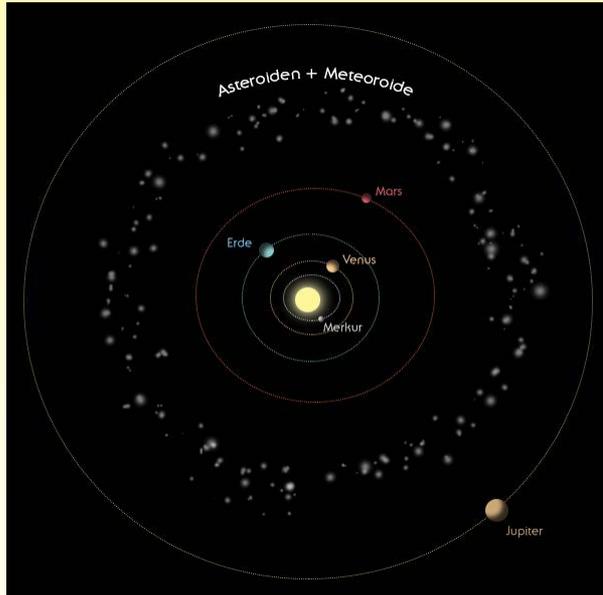
- Fraunhofersche

**Linien** (Absorptionslinien  
im Spektrum der Sonne)

Designation	Element	Wavelength (nm)
A	O <sub>2</sub>	759.370
B	O <sub>2</sub>	686.719
C	H $\alpha$	656.281
a	O <sub>2</sub>	627.661
D <sub>1</sub>	Na	589.592
D <sub>2</sub>	Na	588.995



# Asteroide & Meteorite



## Different Asteroid & Meteorite Types

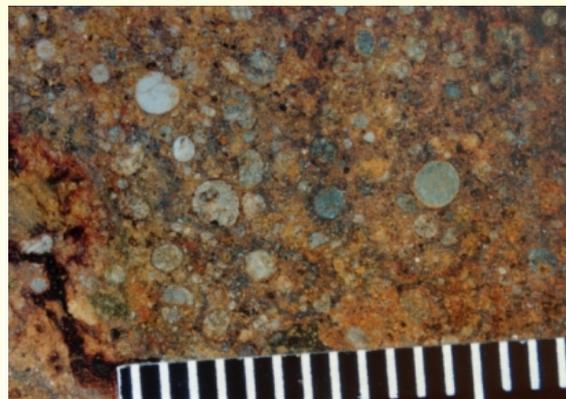
Source: Smithsonian Museum of Natural History [http://www.mnh.si.edu/earth/text/5\\_1\\_4\\_0.html](http://www.mnh.si.edu/earth/text/5_1_4_0.html)

**Chondritic Stony Meteorite**  
Asteroid Type C

**Iron Meteorite**  
Asteroid Type M

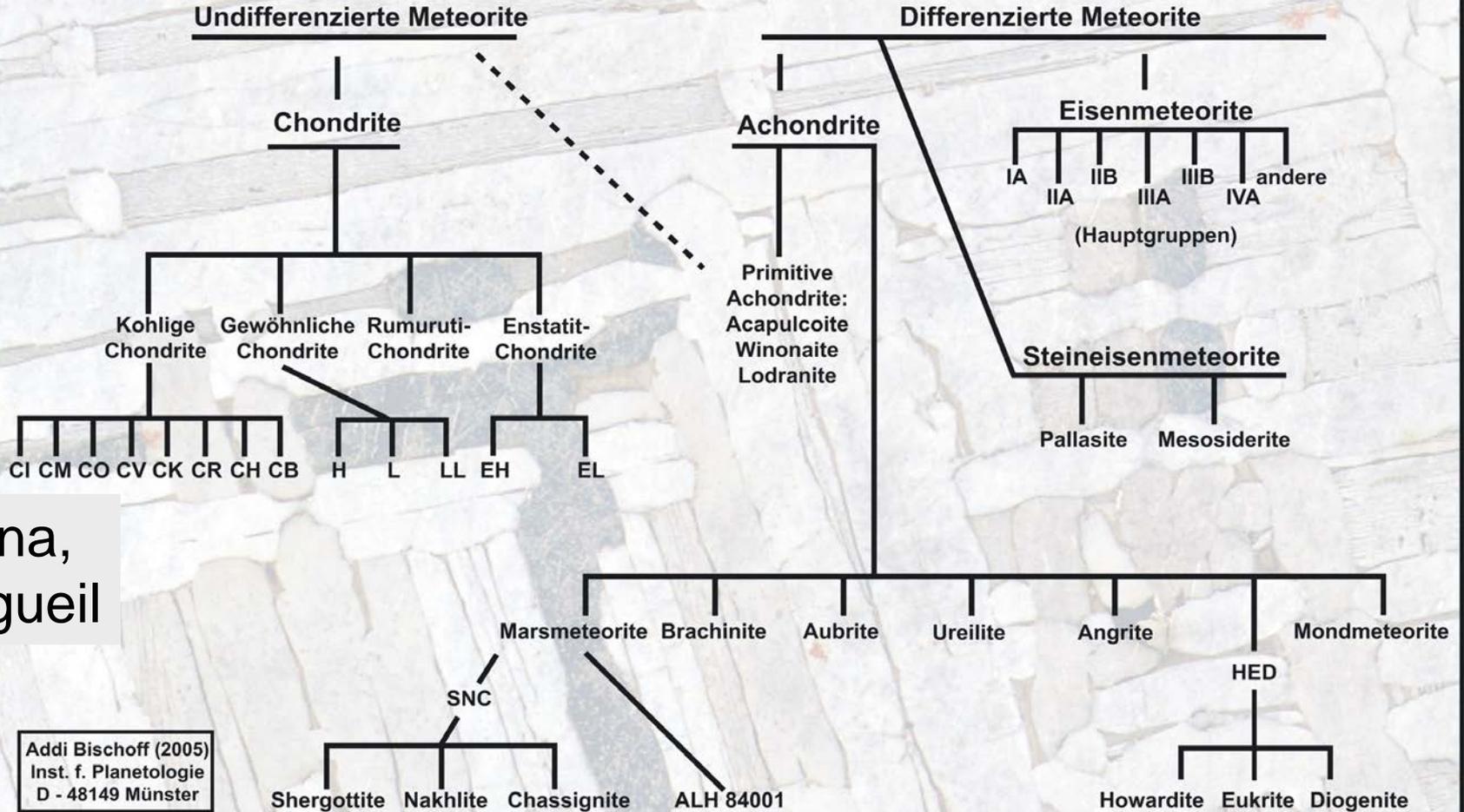
**Pallasite Meteorite**

**Achondritic Stony Meteorite**  
Cumberland Falls Stone, achondrite (aubrite)  
License: Wikimedia Creative Commons  
Asteroid Type S



Chondren  
(Chondrulen) in  
einem chondritischen  
Meteorit

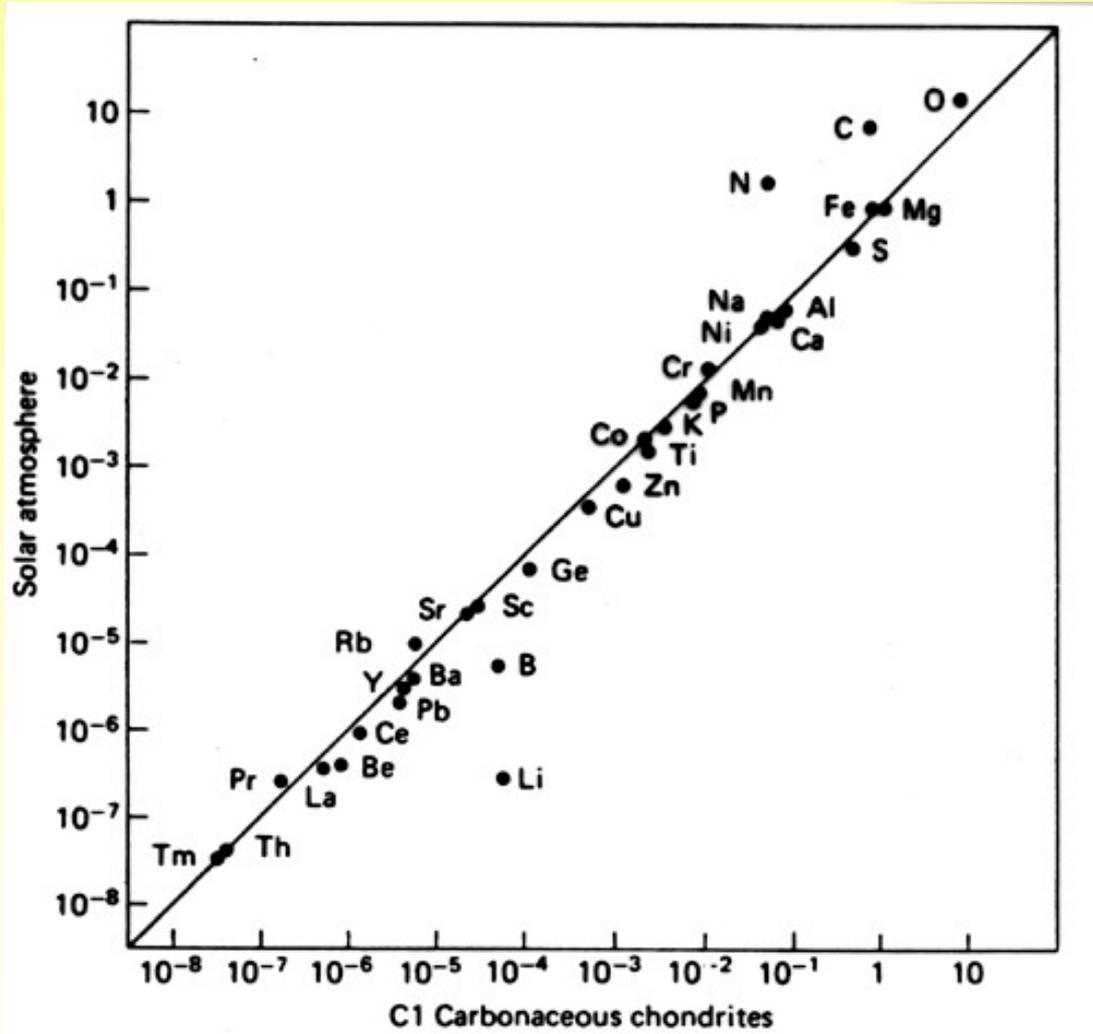
# Klassifikation der Meteorite



Ivuna,  
Orgueil

Addi Bischoff (2005)  
Inst. f. Planetologie  
D - 48149 Münster

# Elementhäufigkeit im Sonnensystem



## Zusammengesetzte Häufigkeitskurve

Korrelation zwischen Elementhäufigkeiten in der Sonne und in kohligen C1-Chondriten

Erde hat ähnliche Elementhäufigkeit wie das gesamte Sonnensystem

# Nukleosynthese = Elemententstehung

- Primordiale Nukleosynthese  
(abgeschlossen)
- Stellare Nukleosynthese  
(findet noch statt – Fusionsreaktionen in Sternen)

Literatur:

[E.M.Burbidge](#), [G.R. Burbidge](#), [W.A. Fowler](#), [F. Hoyle](#) (B<sub>2</sub>FH) (1957)

Synthesis of the elements in stars. Reviews of Modern Physics 29: 567-647

Sachbuch-Klassiker:

[Steven Weinberg](#) (1976): Die ersten drei Minuten

[Hoimar von Dithfurth](#) (1972, 1981, 1993): Im Anfang war der Wasserstoff

# Primordiale Nucleosynthese

Zeit (s)	Temp. (K)	Teilchen
$10^{-33}$	$10^{25}$	Quark - Plasma (Quarks = Elementarteilchen, s. unten)
$10^{-6}$	$10^{13}$	Quarks konnten nicht mehr als freie Teilchen existieren und vereinigten sich zu Hadronen (Protonen und Neutronen)
1	$10^{10}$	Jetzt vernichteten sich Elektronen und Positronen, zurück blieb ein Überschuss an Elektronen <b>Paarbildung</b>
10	$10^9$	<b>Start der primordialen Nucleosynthese</b> Dabei bildeten sich He (25%), D (0.001), sowie Spuren von Li and Be Kernen. Die restlichen 75% bestanden aus Protonen (H)

Nach 3-5 Minuten hatte die Dichte der Materie soweit abgenommen, dass die **primordiale Nucleosynthese** zum Erliegen kam

Alle schwereren Elemente entstanden erst später im Zuge der **stellaren Nucleosynthese** im Inneren von Sternen



Gamow: Begründer der Urknalltheorie

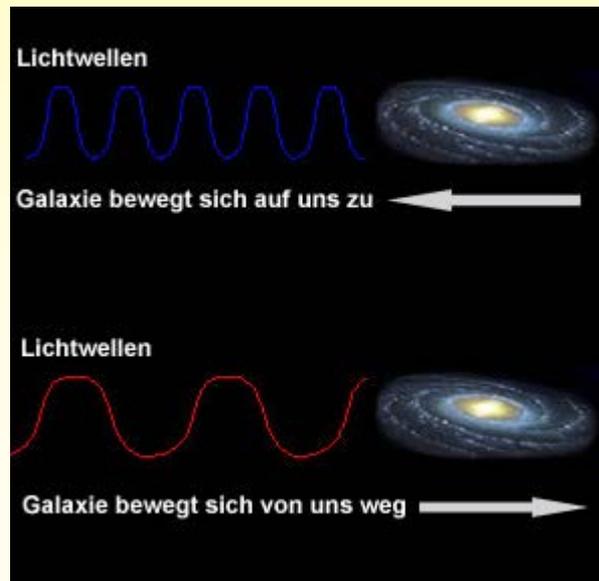
# Urknalltheorie (Lemaître 1931)

- Bestätigt durch **Hintergrundstrahlung**  
(Penzias & Wilson 1965)



# Expansion des Universums

- Bestätigt durch **Kosmologische Rotverschiebung**  
(Hubble 1929)

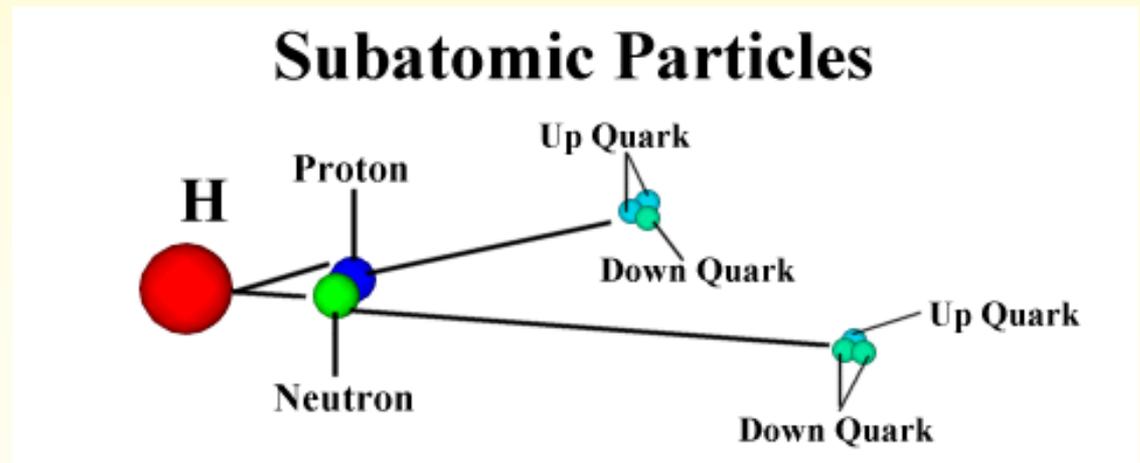


# Primordiale Nucleosynthese

Zeit (s)	Temp. (K)	Teilchen
$10^{-33}$	$10^{25}$	Quark - Plasma (Quarks = Elementarteilchen, s. unten)
$10^{-6}$	$10^{13}$	Quarks konnten nicht mehr als freie Teilchen existieren und vereinigten sich zu Hadronen (Protonen und Neutronen)
1	$10^{10}$	Jetzt vernichteten sich Elektronen und Positronen, zurück blieb ein Überschuss an Elektronen <b>Paarbildung</b>
10	$10^9$	<b>Start der primordialen Nucleosynthese</b> Dabei bildeten sich He (25%), D (0.001), sowie Spuren von Li and Be Kernen. Die restlichen 75% bestanden aus Protonen (H)

Nach 3-5 Minuten hatte die Dichte der Materie soweit abgenommen, dass die **primordiale Nucleosynthese** zum Erliegen kam

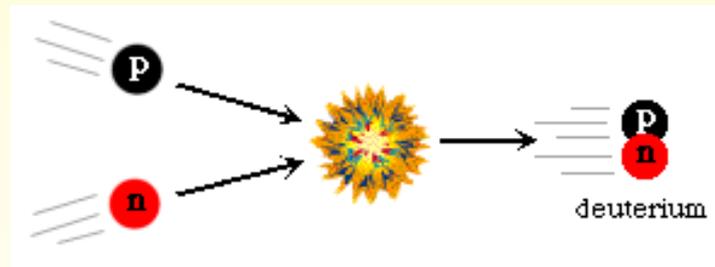
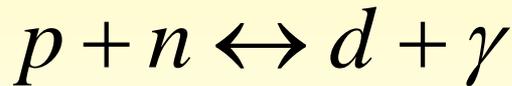
Alle schwereren Elemente entstanden erst später im Zuge der **stellaren Nucleosynthese** im Inneren von Sternen



# Primordiale Nukleosynthese

1 s - 180 s

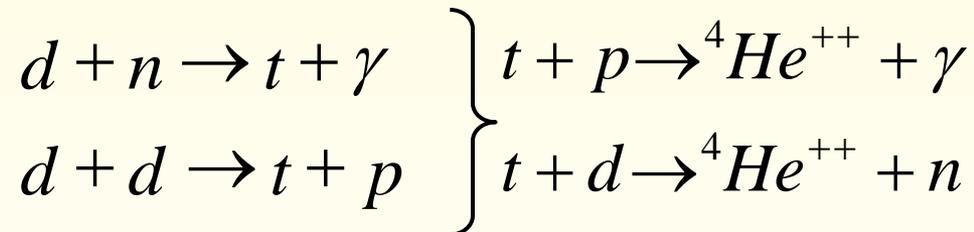
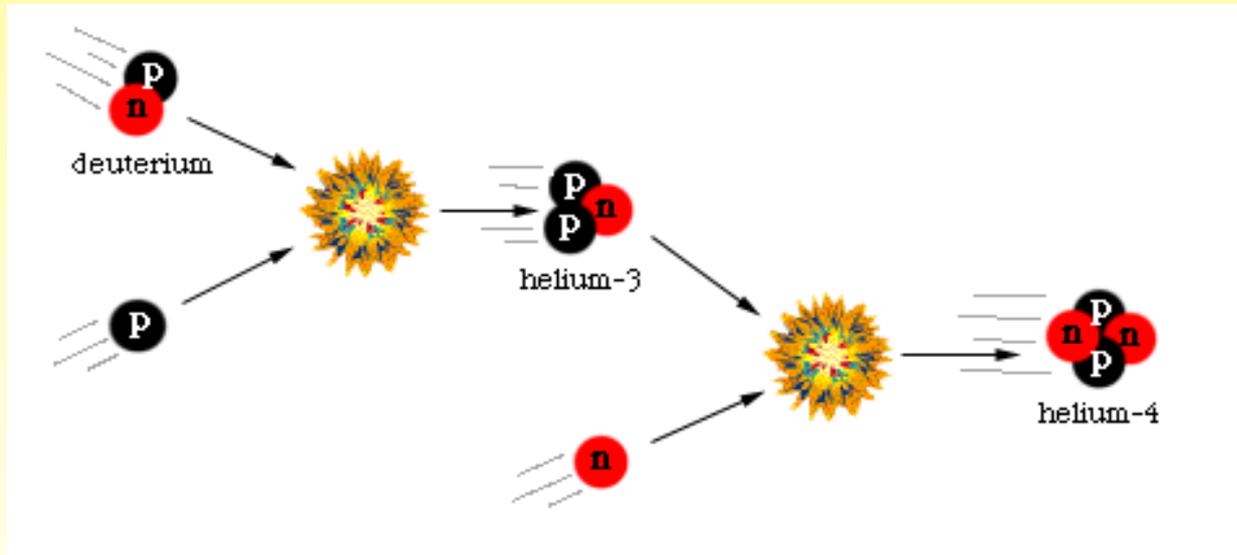
- Temperatur zu hoch als dass Elektronen mit den Nukleonen neutrale Atome bilden
- leichtester Atomkern = Wasserstoffkern = Proton
- Bildung von Deuteriumkern D = schwerer Wasserstoff:



# Primordiale Nukleosynthese

180 s - 1000 s

anschließende Reaktionen mit Deuteron, Tritium und Helium:



# Primordiale Nukleosynthese

- Nur **Wasserstoff** und **Helium** (neben Spuren des Wasserstoff-Isotops Deuterium sowie Lithium) wurden gebildet.
- Die Theorie sagt ein Massenverhältnis von 25 % Helium zu 75 % Wasserstoff voraus ( $H/He = 3$ ).
- Sie dauerte nur etwa 3-5 Minuten; danach fielen Temperatur und Dichte des Universums unter die kritischen Werte, die für die Kernfusion nötig sind.

# THE CREATION OF THE UNIVERSE

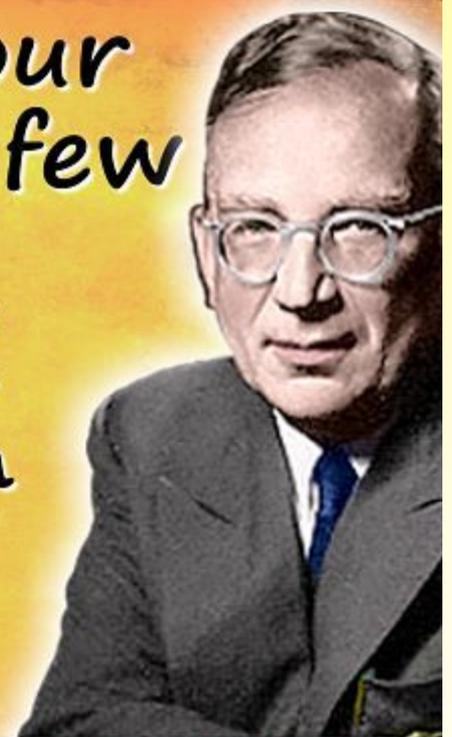
GEORGE GAMOW

Die **Alpher-Bethe-Gamow**-„ $\alpha\beta\gamma$ “-  
Theorie (1948)

**B<sub>2</sub>FH** (1957)

*It took less than an hour  
to make the atoms, a few  
hundred million years  
to make the stars and  
planets, but five billion  
years to make man!*

*George Gamow*



More science quotes at Today in Science History [todayinsci.com](http://todayinsci.com)

# Stellare Nukleosynthese

- Interstellare Staub und Gaswolke: H & He
- Durch gravitative Zusammenballung entstehen Regionen hoher Dichte: dichte Wolken, Protosterne
- Kontraktion setzt Energie frei; dadurch Temperaturanstieg

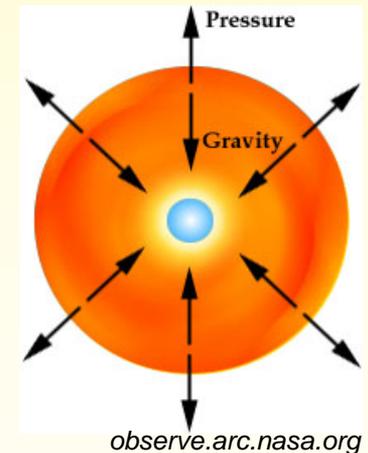
Hydrogenfusion (Wasserstoffbrennen) bei Temperaturen von ~20 Millionen Grad und Drücken von  $6 \text{ g/cm}^{-3}$ .



Sternentstehungsgebiete

Orion nebula: NASA/HubbleST

In Sternen Gleichgewicht zwischen thermischer Expansion and gravitivem Kollaps

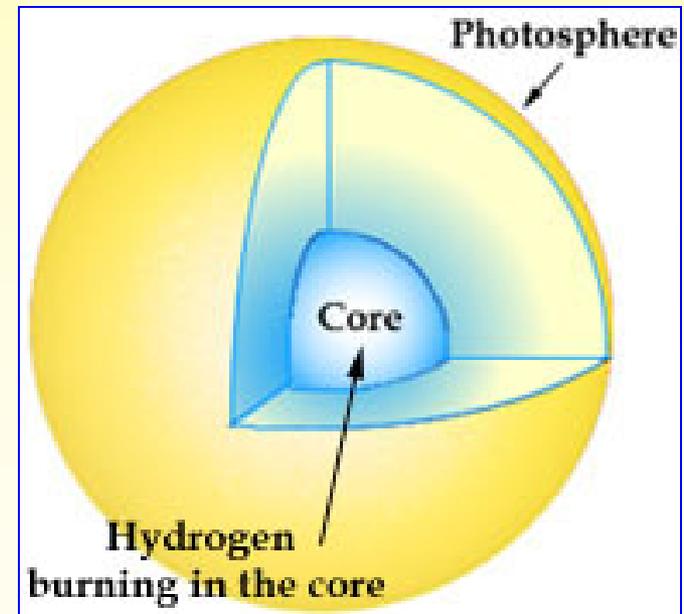
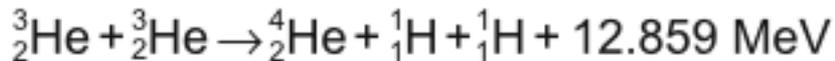
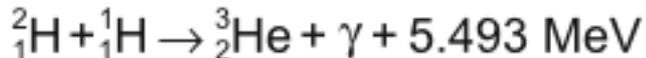
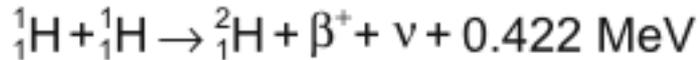


# Stellare Kernfusion

## 1. Schritt: Wasserstoffbrennen

Erste Sternengeneration: Bildung schwerer Elemente durch direkte Verschmelzung zweier Protonen. Die "Asche", die dabei entsteht, ist  ${}^4\text{He}$ .

Auch in der Sonne findet diese Proton-Proton-Reaktion statt bei der  ${}^4\text{He}$  mit entsprechendem Energiegewinn entsteht.



# CNO-Zyklus

## Bethe-Weizsäcker-Zyklus

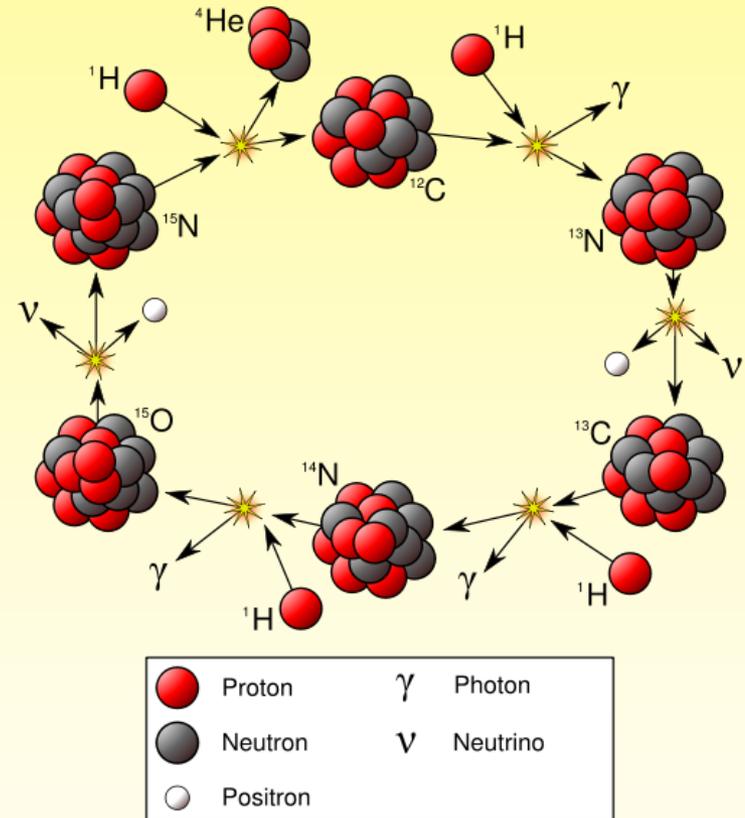
Alternativer Prozess zur reinen Proton-Proton-Reaktion

Findet auch in schweren Sternen aber auch in der Sonne statt

Kohlenstoff-katalysierter Fusionszyklus;  $^{12}\text{C}$  als Katalysator

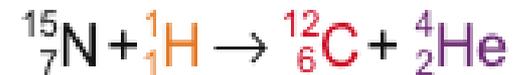
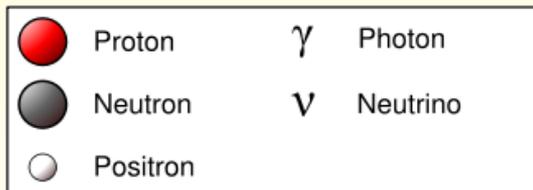
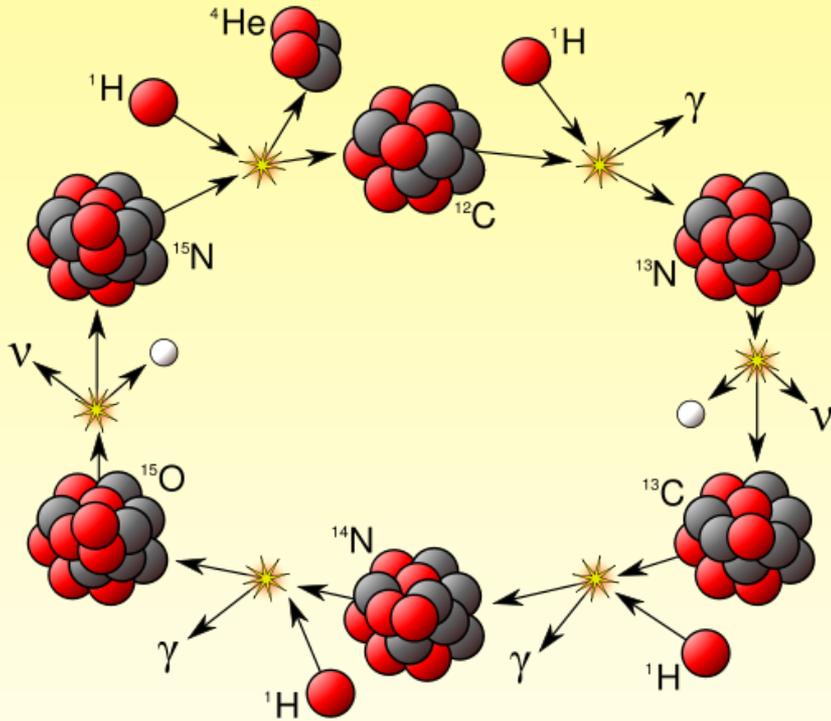
Nur möglich in Sternen der zweiten Generation, d.h. in Sternen, die bereits  $^{12}\text{C}$  enthalten, das in einem Vorgängerstern gebildet wurde

Höherer Energiegewinn als bei direkter Proton-Proton Fusion



# CNO-Zyklus

## Bethe-Weizsäcker-Zyklus



Gesamtergebnis des Zyklus ist die Fusion von vier Wasserstoffkernen  $1\text{H}^+$  zu einem Heliumkern  $4\text{He}^{2+}$  ( $\alpha$ -Teilchen).

# Stellare Kernfusion

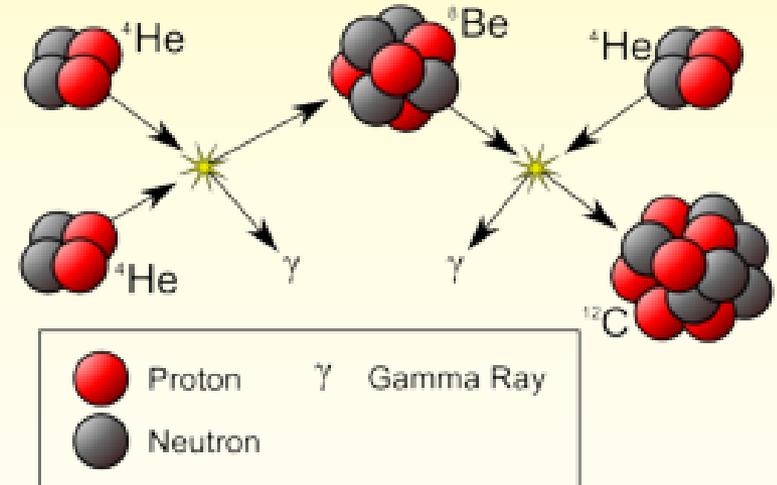
## 2. Schritt: Das Heliumbrennen (3 $\alpha$ -Prozess)

- Fusion zu Ende wenn H im Kern des Sterns aufgebraucht ist.
- Gravitativer Kollaps führt zur Temperaturerhöhung (> 100 Mio. K) und Dichteanstieg.
- Heliumbrennen setzt ein: He-Fusionsreaktionen (3 $\alpha$ -Prozess) und Bildung von  $^{12}\text{C}$ .
- Leichte Elemente Li, Be, B werden übersprungen



Wasserstoffvorrat unserer Sonne in rund 5 Milliarden Jahren ausgebrannt.

Sonne bläht sich auf und "verschluckt" innere Planeten Merkur und Venus.



# Weitere Fusionschritte

## Entstehung schwerer Elemente

- Heliumbrennen endet, wenn zu wenig He vorhanden ist.
- Stern inzwischen aufgebläht und rot aufgebläht (Roter Riese)
- Kern (hauptsächlich aus Kohlenstoff und Sauerstoff) stürzt durch Gravitationskraft in sich zusammen (kollabiert)
- → Temperatur- und Dichteanstieg. Entzündungstemperatur für das **Kohlenstoffbrennen** (bei Sternen  $> 4$  Sonnenmassen) erreicht. Kleinere Sterne kühlen ab und kontrahieren zu weißen Zwergen
- Durch die Temperaturerhöhung im Inneren des Sterns kann in einer Schale um den Kernbereich wieder das Heliumbrennen einsetzen → **Schalenbrennen**.
- Die neue Energiefreisetzung bewirkt ein endgültiges Aufblähen des Sterns zum roten Riesenstern

# Das Kohlenstoffbrennen

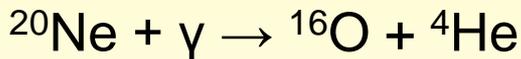


# Das Neonbrennen

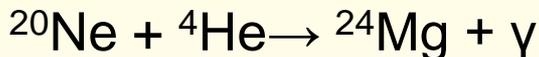
Nach einigen 1000 Jahren ist der Kohlenstoff aufgebraucht

Kern kühlt ab und zieht sich wieder zusammen

Kontraktion bewirkt Temperaturanstieg → Neonbrennen in Sternen mit Massen >8 Sonnenmassen. Bei derart hohen Temperaturen spielt die **Photodesintegration** eine wichtige Rolle:



Das  ${}^4\text{He}$  kann mit einem weiteren  ${}^{20}\text{Ne}$  reagieren, um  ${}^{24}\text{Mg}$  zu erzeugen:



# Das Sauerstoffbrennen

Betrifft Sterne mit einer Ausgangsmasse von >8 Sonnenmassen.  
Fusion zweier Sauerstoffkerne  $^{16}\text{O}$  zu verschiedenen neuen  
Kernen, darunter Schwefel (S), Phosphor (P) und Silizium (Si).  
Dabei werden Gammaquanten, Neutronen, Protonen und  
Alphateilchen frei



# Das Siliziumbrennen

Siliziumbrennen folgt auf Sauerstoffbrennen, welches endet, wenn kein weiterer Sauerstoff für die Fusion vorhanden ist

Zwei Siliziumkerne  $^{28}\text{Si}$  verschmelzen dabei zu  $^{56}\text{Ni}$ , das durch zwei  $\beta$ -Zerfälle über  $^{56}\text{Co}$  schließlich in  $^{56}\text{Fe}$  umgewandelt wird

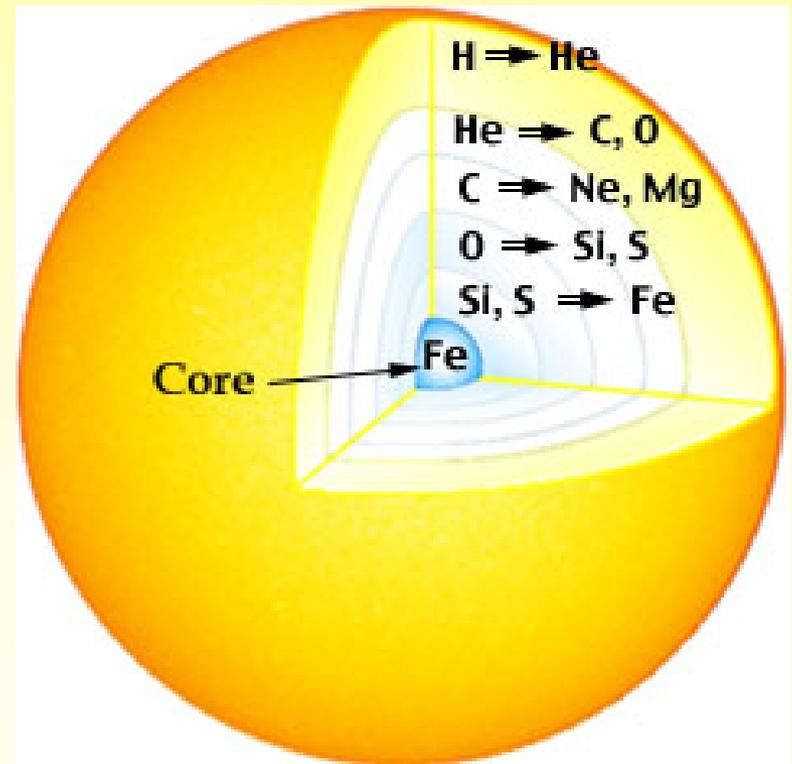
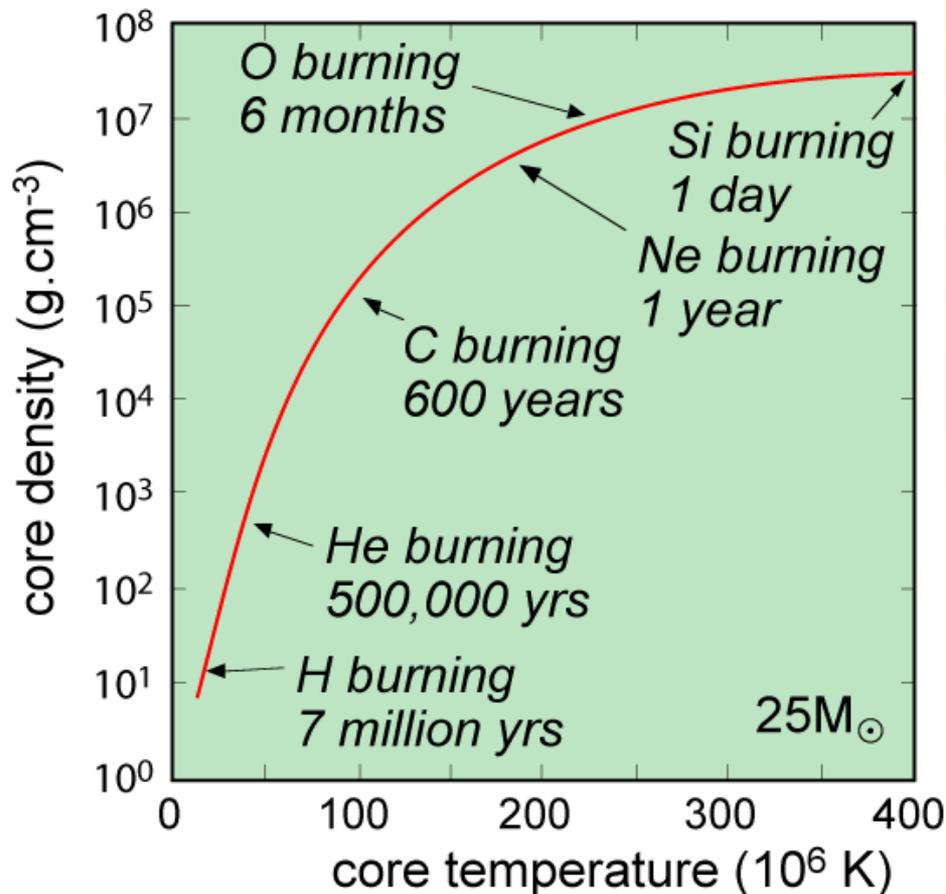
Während des Siliziumbrennens im Kern laufen weiterhin in Schalen um den Kern herum das Sauerstoff-, Neon-, Kohlenstoff-, Helium- und Wasserstoffbrennen ab

Das Siliziumbrennen stellt das Ende der thermonuklearen Brennprozesse dar, da die Endprodukte, vor allem  $^{56}\text{Fe}$ , die höchsten **Bindungsenergien** pro Nukleon besitzen.

Der Vorrat an Kernbrennstoff im Inneren wird beim Siliziumbrennen in nur einigen Stunden bis zu wenigen Tagen aufgebraucht, und dem Gravitationskollaps folgt **Supernovaexplosion**

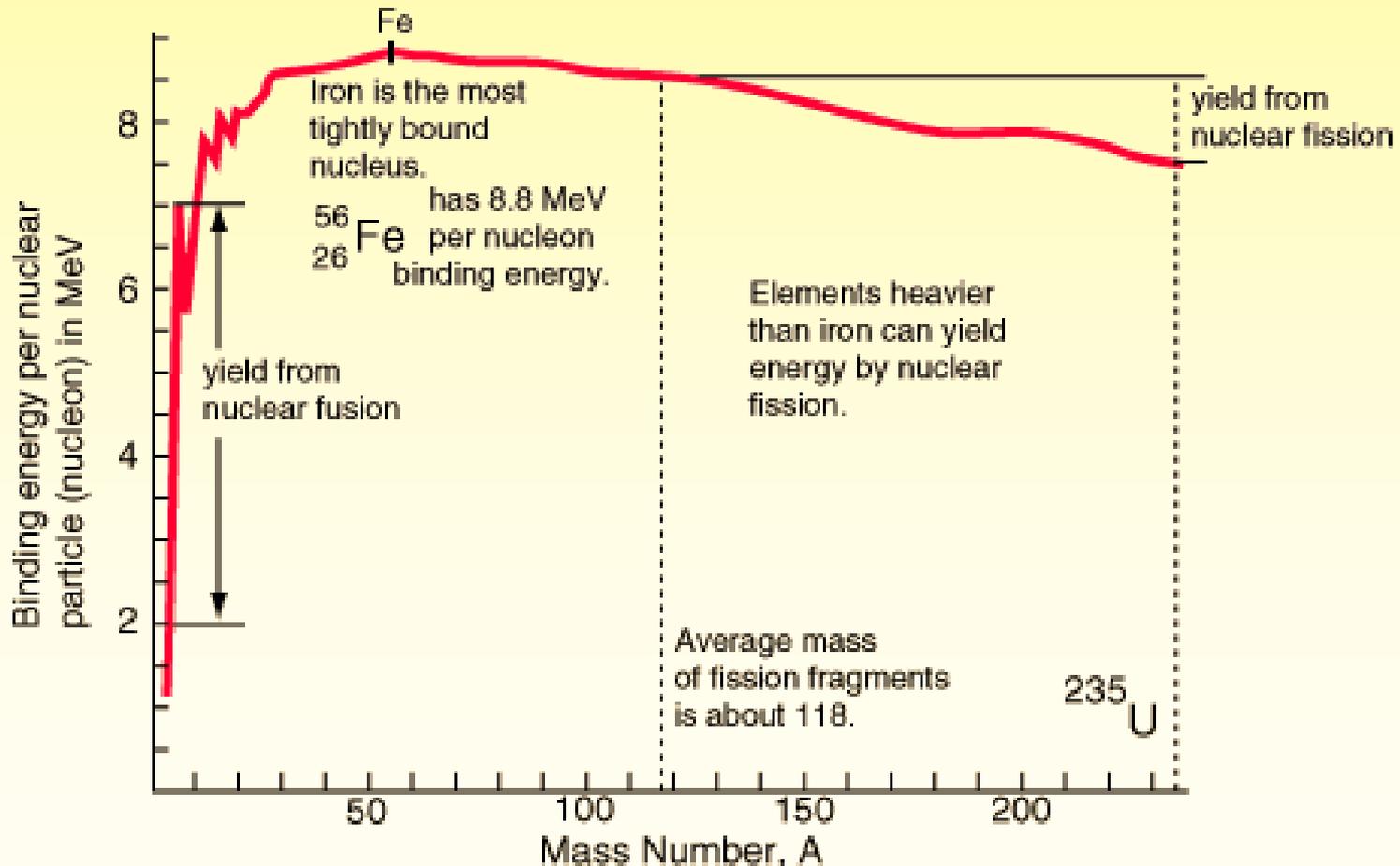
# Stellare Nukleosynthese

- Increasingly heavier elements take shorter amounts of time to be exhausted
- This process stalls at  $A = 56$  (mostly  $^{56}\text{Fe}$ ).**

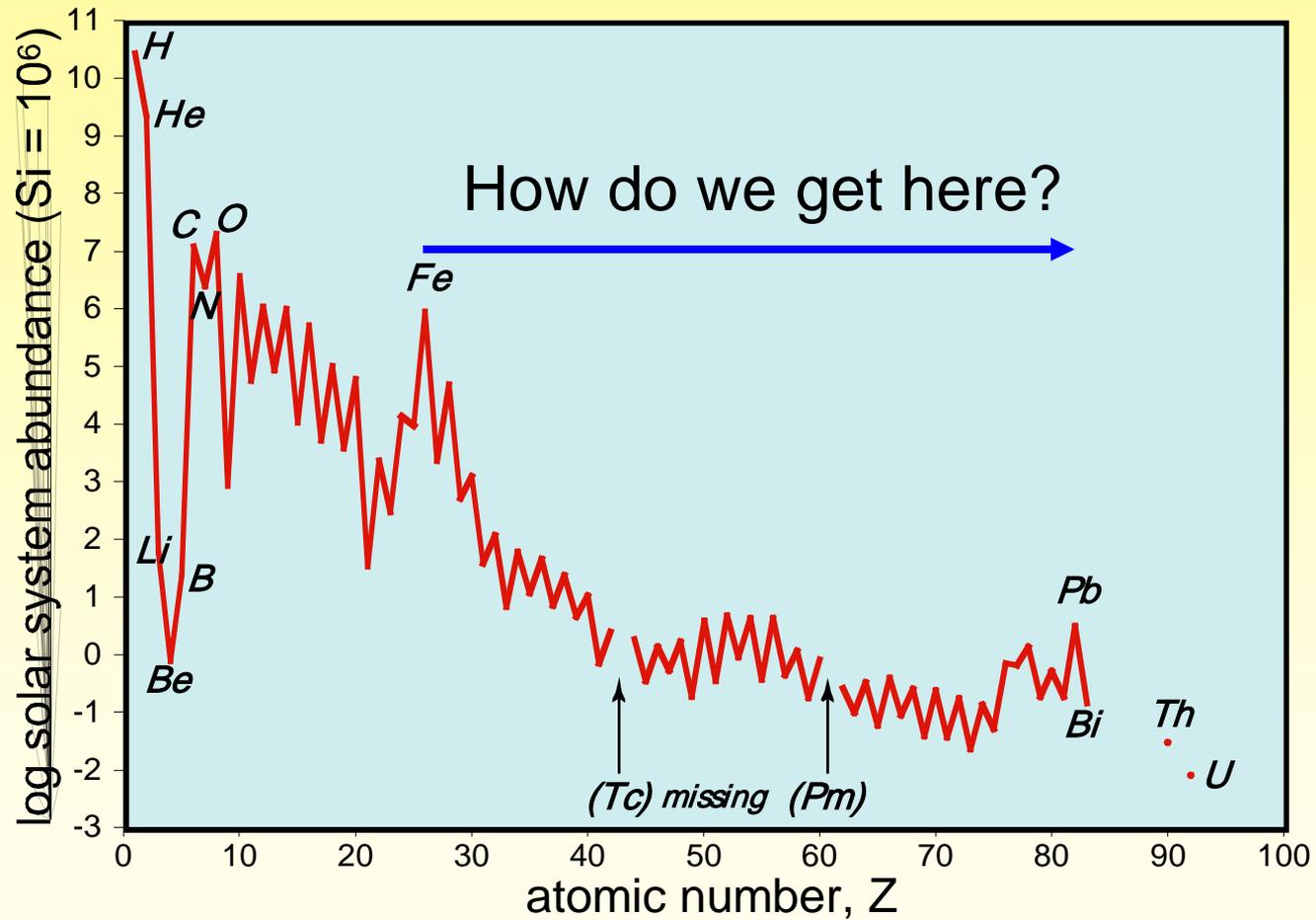


# Nukleosynthese

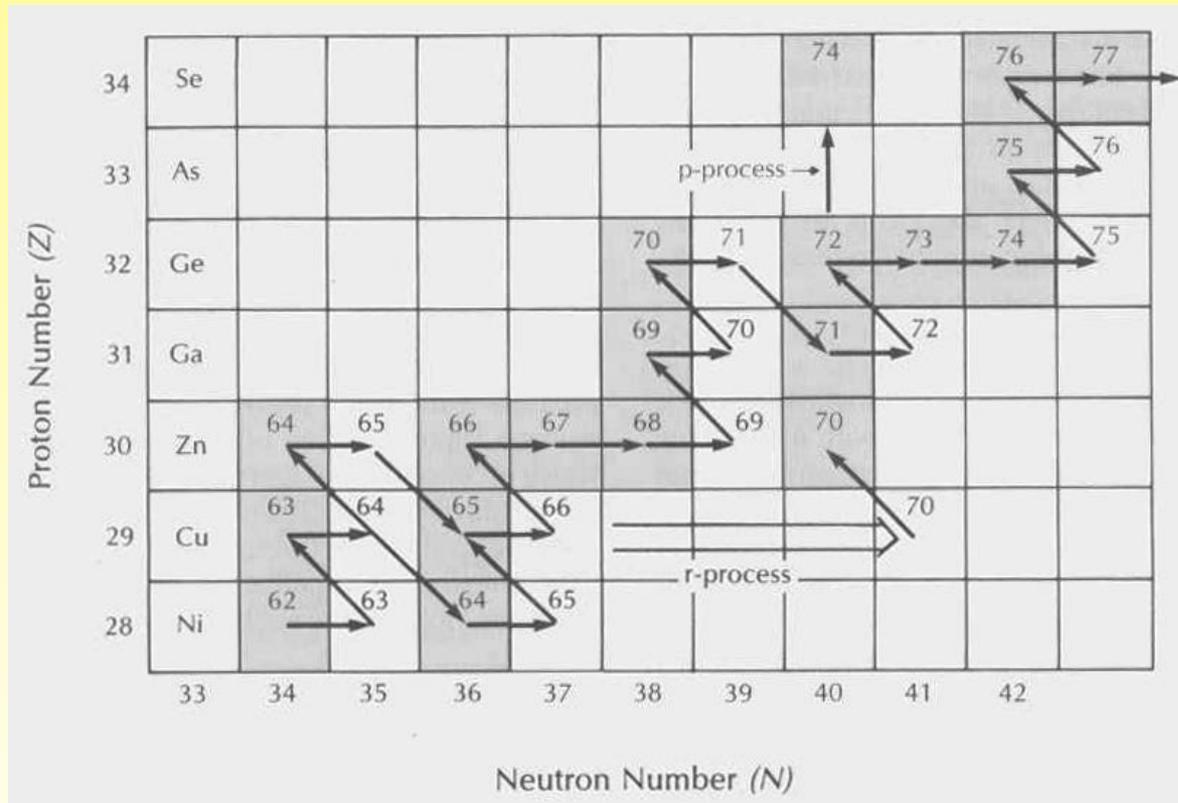
- $^{56}\text{Fe}$  is the heaviest elements obtained by fusion process: represent maximum binding energy per nucleon.
- Fusion of Fe nuclei to make heavier elements would require energy input, therefore fusion reactions stop in star's Fe core.



# Nucleosynthesis



# slow or s-process



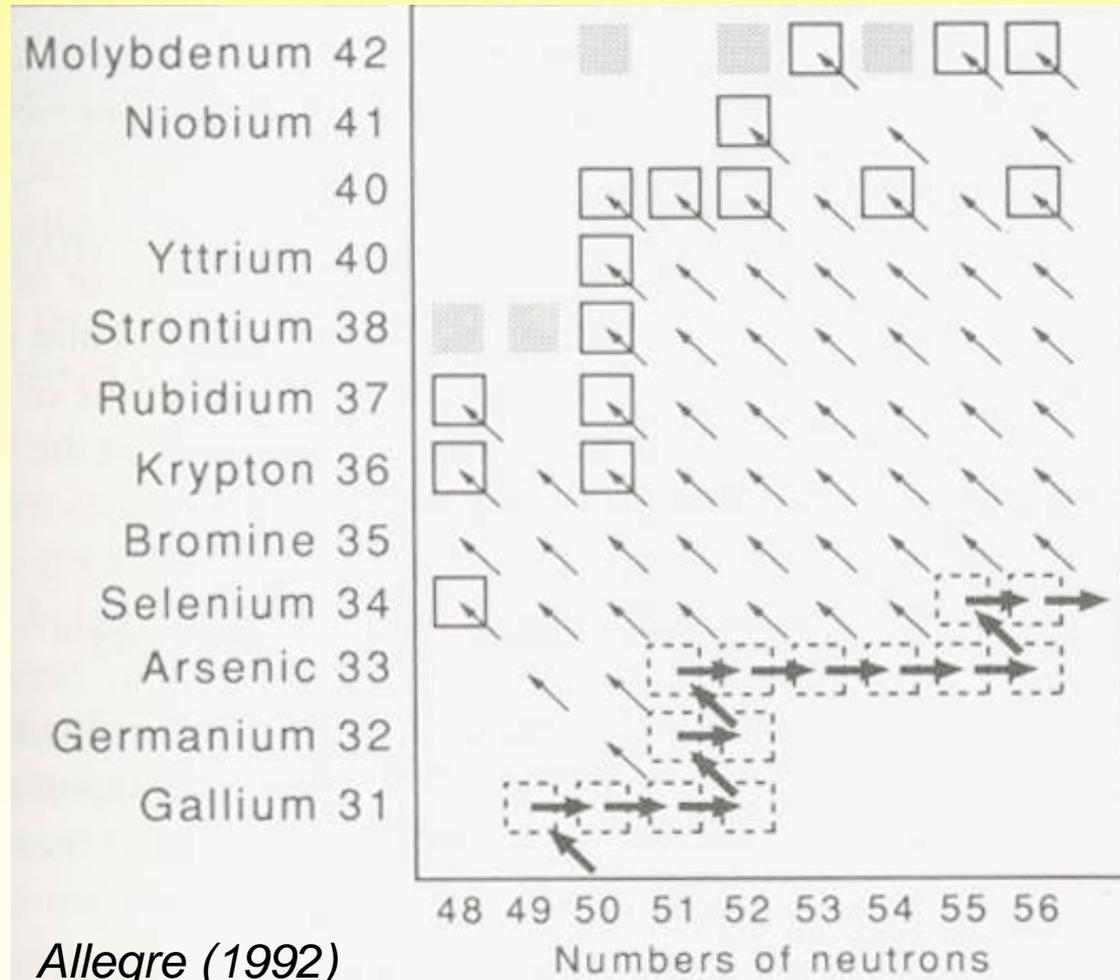
If neutron flux is low enough product nucleus to decay before next neutron is added.

# rapid or r-process

- 'rapid' neutron capture relative to  $\beta$ -decay

Durch hohen Neutronenfluss entstehen schwere instabile neutronenreiche Atomkerne.

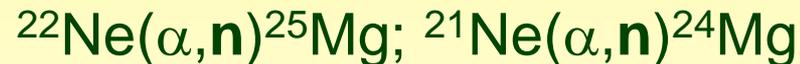
Anschließend mehrere aufeinanderfolgende  $\beta$ -Zerfälle entlang der Isobaren bis zum stabilen Nuklid.



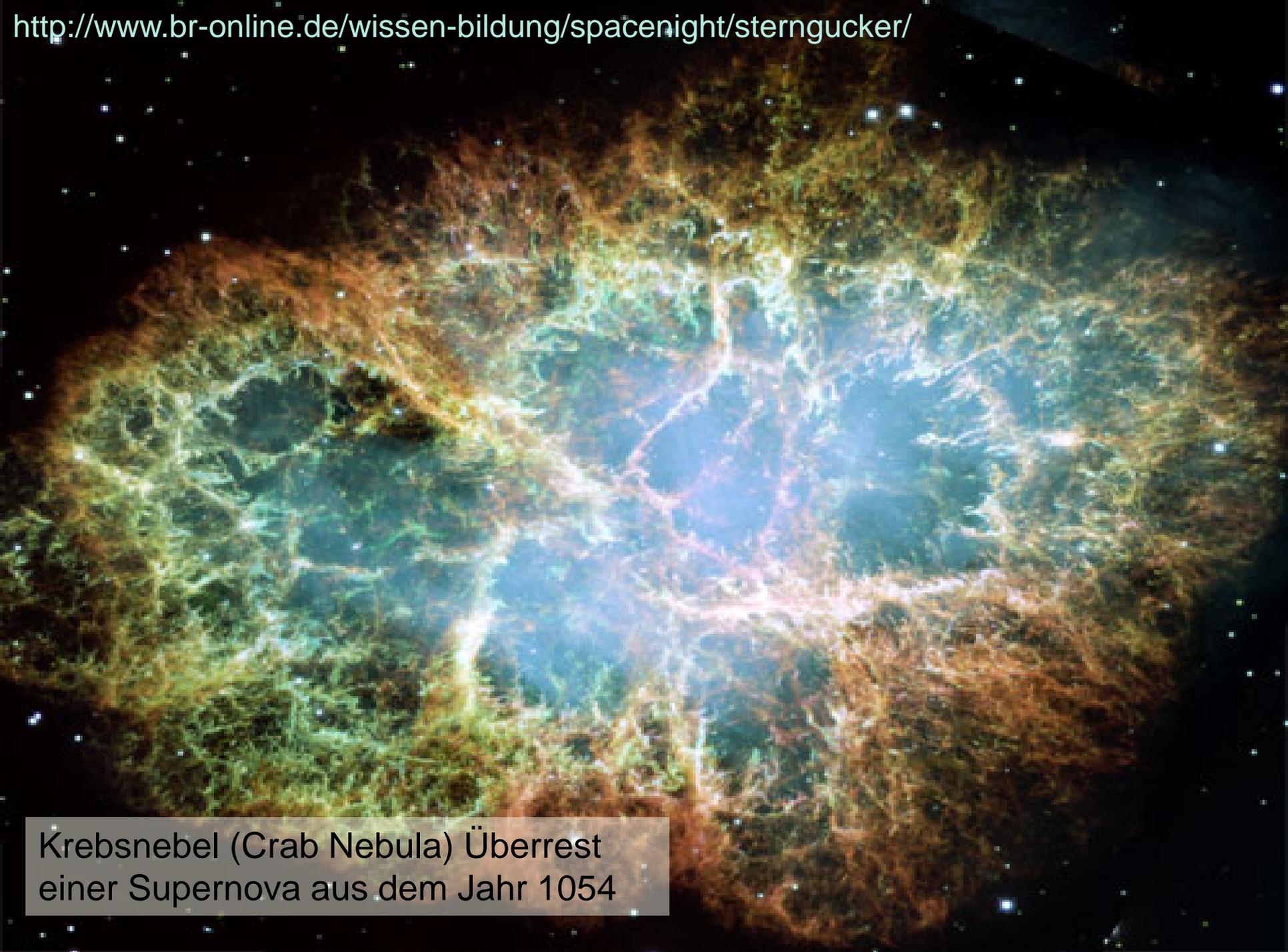
# Wo finden s- und r-Prozesse statt?

- **s-Prozess:** beim Schalenbrennen - Fusionsreaktionen, die Neutronen freisetzen

Mögliche Neutronen-produzierende Reaktionen:



- Diese Neutronen werden beim s-Prozess bevorzugt von schweren Atomkernen eingefangen
- r-Prozess: bei **Supernova-Explosionen**. Durch den sehr hohen Neutronenfluss können in Sekundenbruchteilen sehr viele Neutronenanlagerungen stattfinden



Krebsnebel (Crab Nebula) Überrest  
einer Supernova aus dem Jahr 1054

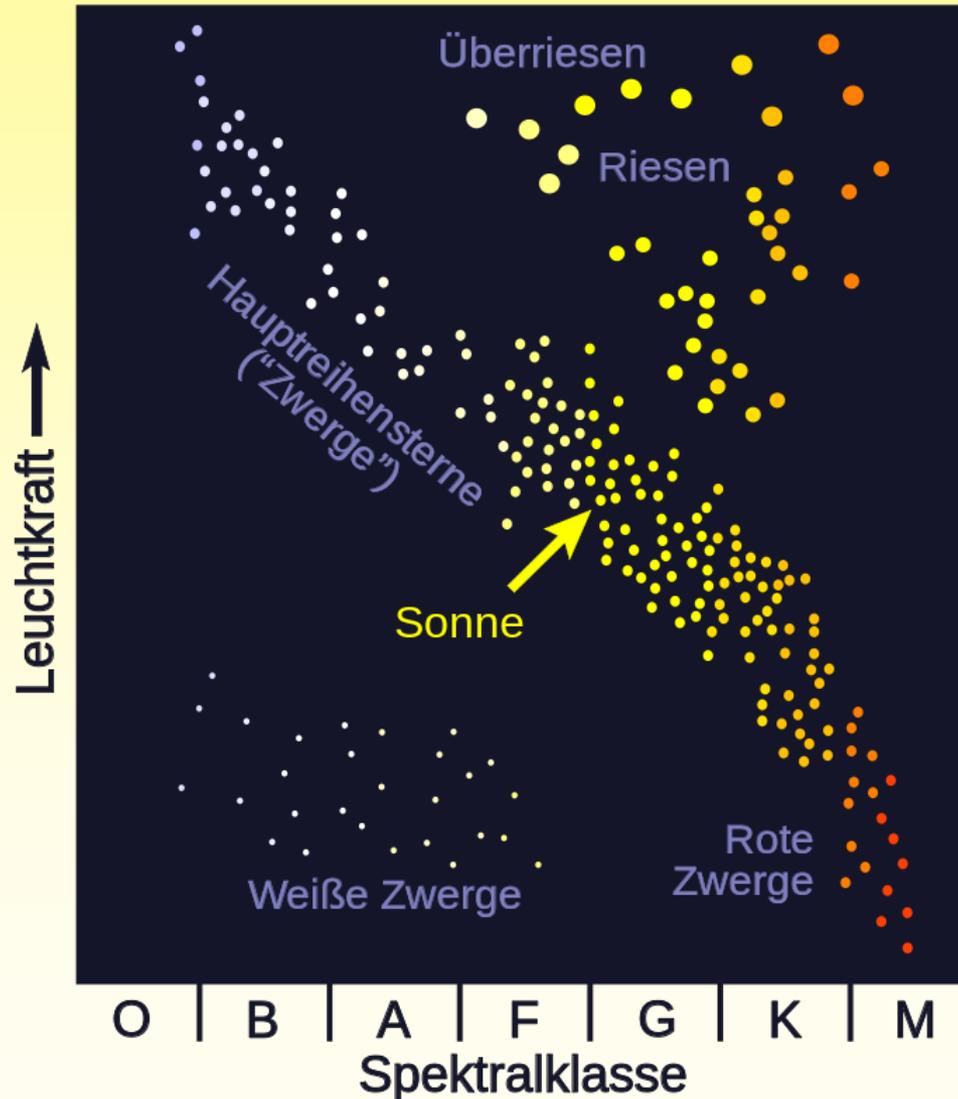
# Hertzsprung-Russell-Diagramm (H.N. Russell 1913)

Klassifizierung von Sternen nach Leuchtkraft und Spektralklasse

In der Hauptreihe liegen alle Sterne, die sich im Stadium der Wasserstoff-Fusion befinden.

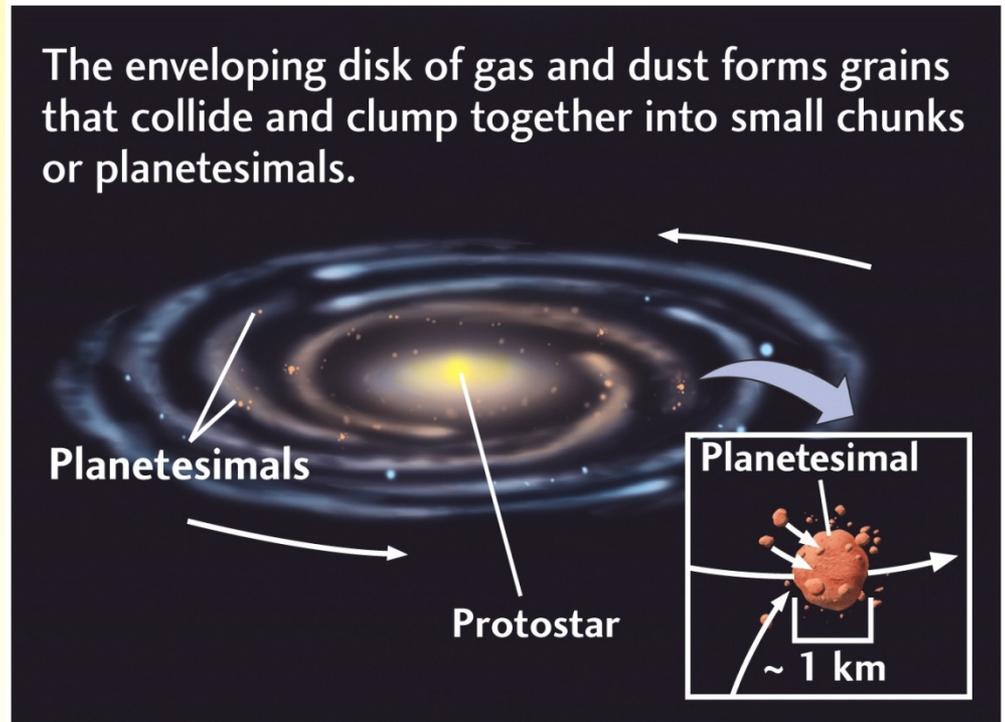
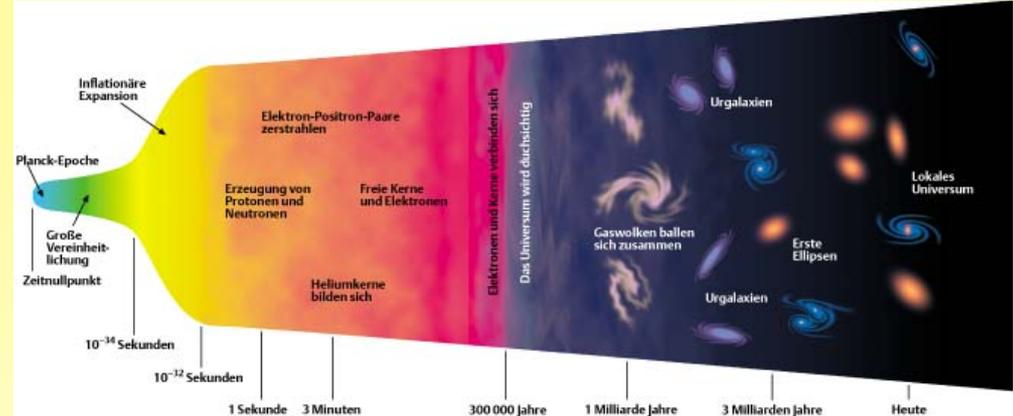
Ast zu den (roten) **Riesen**. Dort befinden sich alte Sterne, die bereits in die Phase des Helium-Brennens übergegangen sind.

Auf isolierter Insel liegen **weiße Zwerge**, die ihr Leben praktisch abgeschlossen haben (Sterne im Rentenalter)



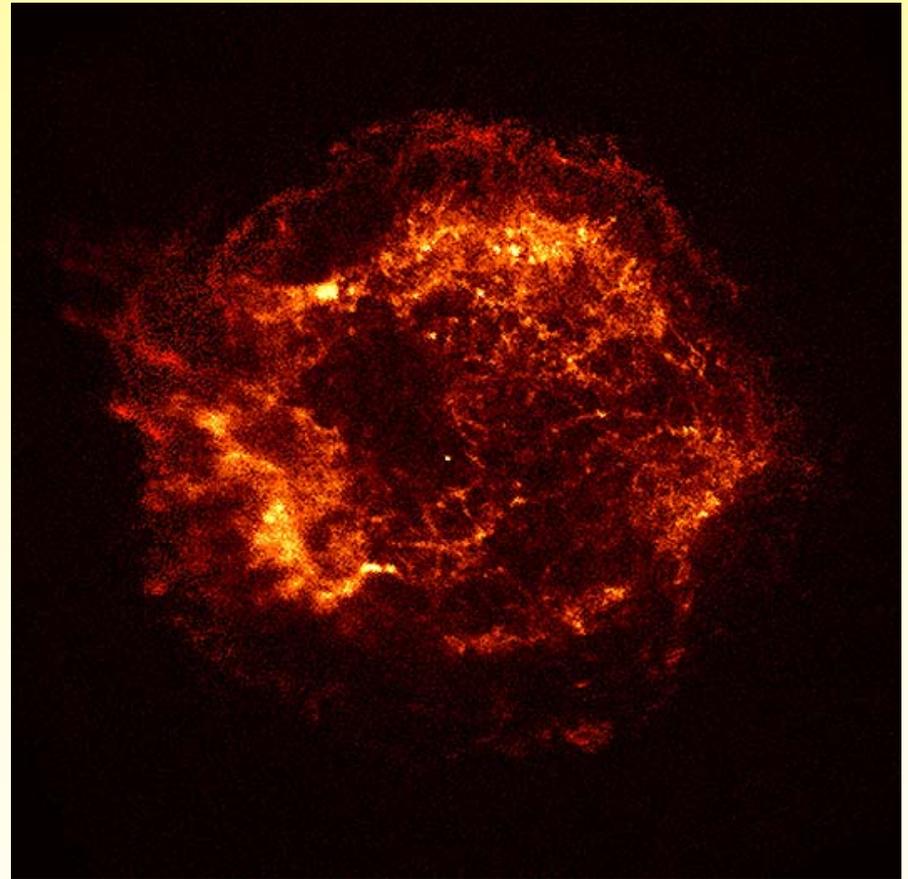
# Entstehung des Sonnensystems

- Entstehung des Sonnensystems aus einem ausgedehnten interstellaren Nebel aus Gas und Staubpartikeln vor c. 4.6 Ga
- Dieser Urnebel war das Überbleibsel einer Supernovaexplosion und daher mit schweren Elementen angereichert
- Urnebel kollabierte und begann, gravitativ in sich zusammen zu stürzen
- Urnebel erhielt einen **Drehimpuls** (durch Kollision?) und begann zu rotieren
- Zentrifugalkraft flachte den Urnebel ab, und es bildete sich eine Gas- und Staubscheibe mit einer Protosonne im Zentrum



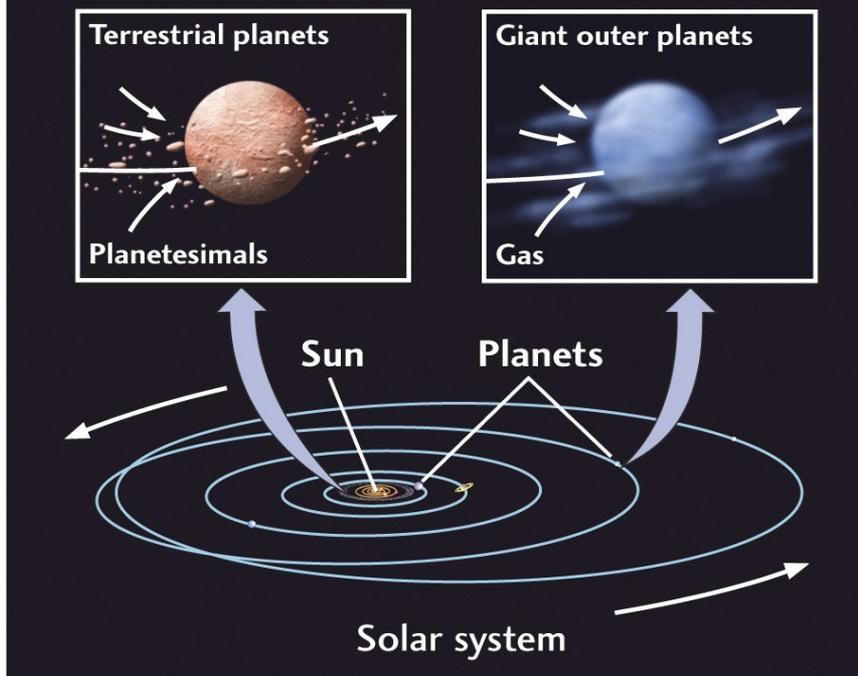
# Wann erfolgte die Supernova Explosion aus der unser Sonnensystem (und wir selbst) hervorgegangen sind?

- Meteorites show anomalies related to short lived radioisotopes such as  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{55}\text{Mn}$ ,  $^{244}\text{Pu}$
- These were incorporated into solar system within a few 10's millions years after dispersal by a supernova explosion



# Bildung der Planeten

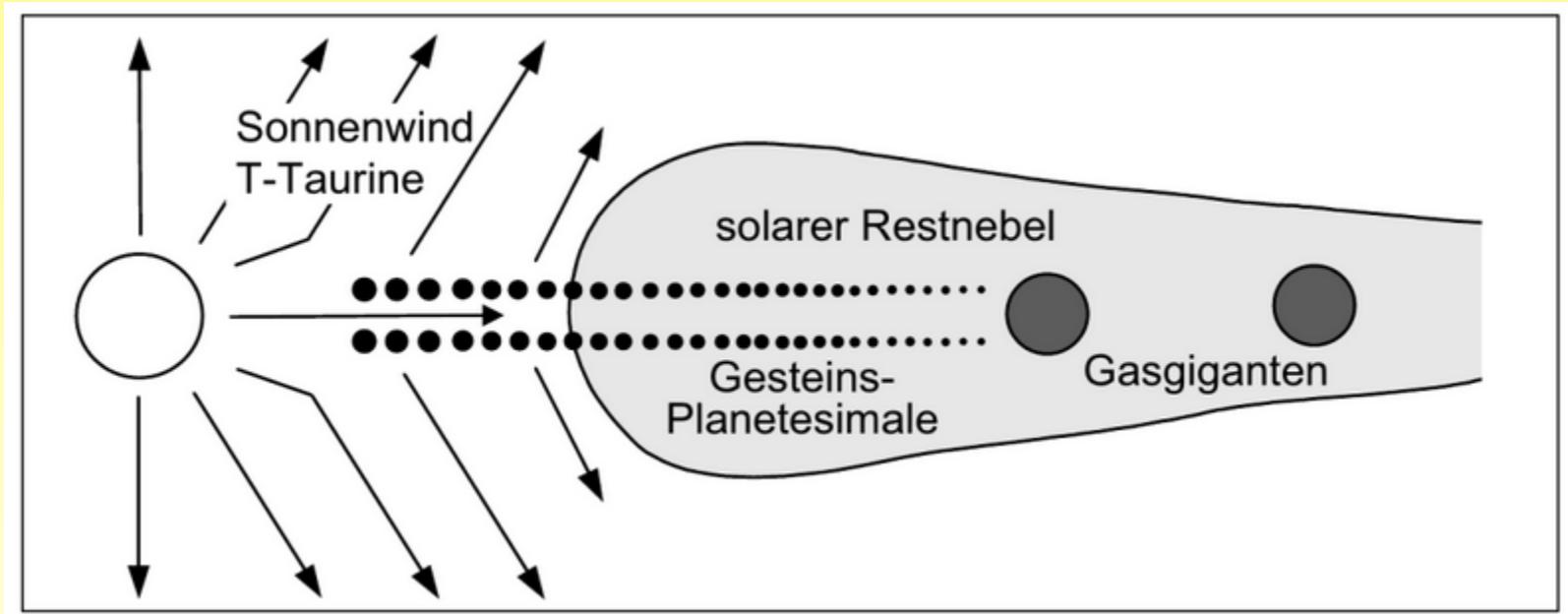
The terrestrial planets build up by multiple collisions and accretion of planetesimals by gravitational attraction. Giant outer planets grew by gas accretion.



- In der Scheibe kondensierten bei abnehmender Temperatur Metalle und ihre Oxide, verschiedene Minerale.
- Es bildeten sich Staubpartikel, die sich durch gegenseitige gravitative Anziehung zu immer größeren Aggregaten zusammenballten → den **Planetesimalen**

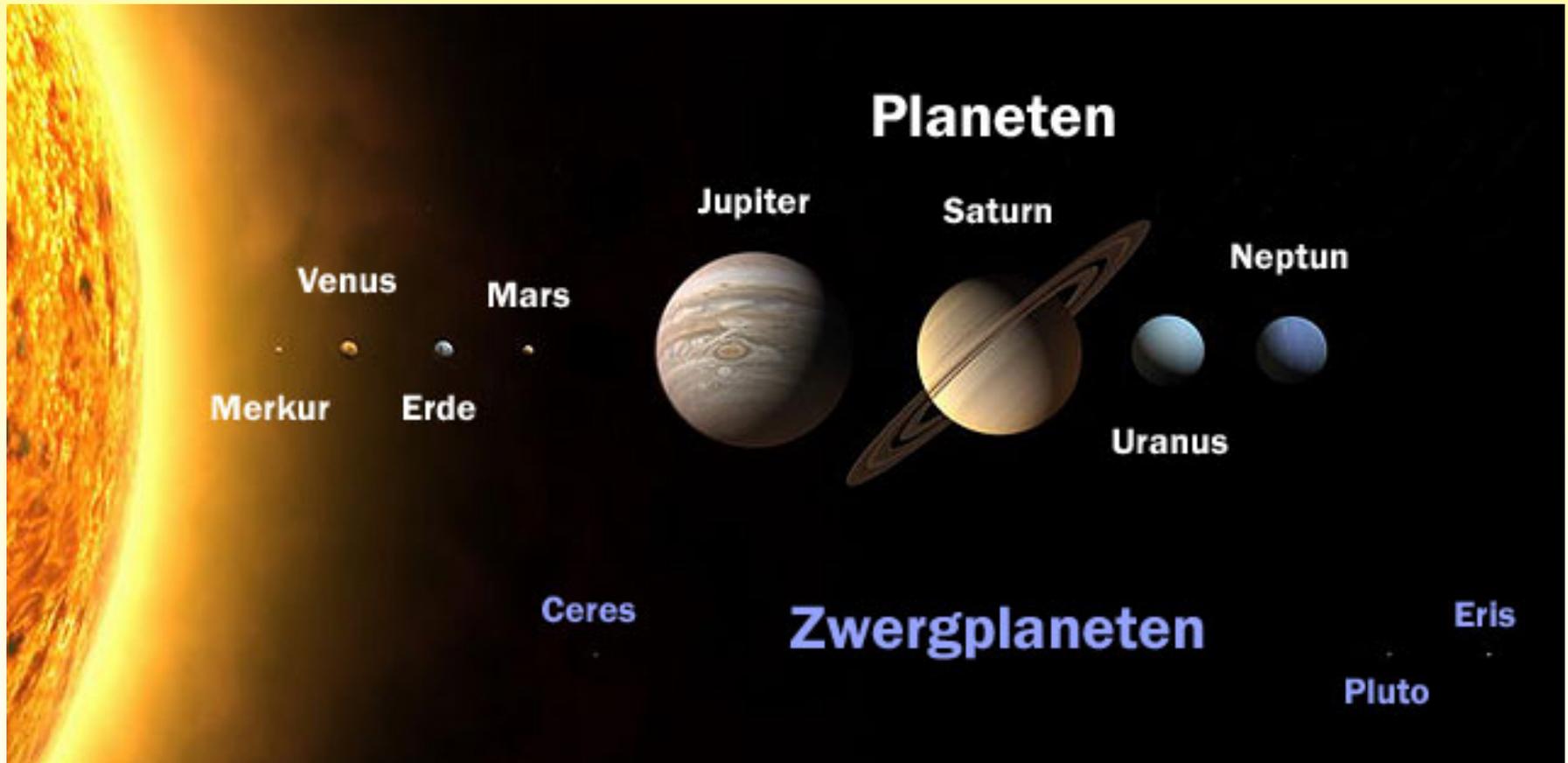
- Durch den Zusammenprall und die Vereinigung vieler Planetesimale entstanden vor ca. 4.56 Ga die neun Planeten.

# Sonne in der T-Tauri-Phase

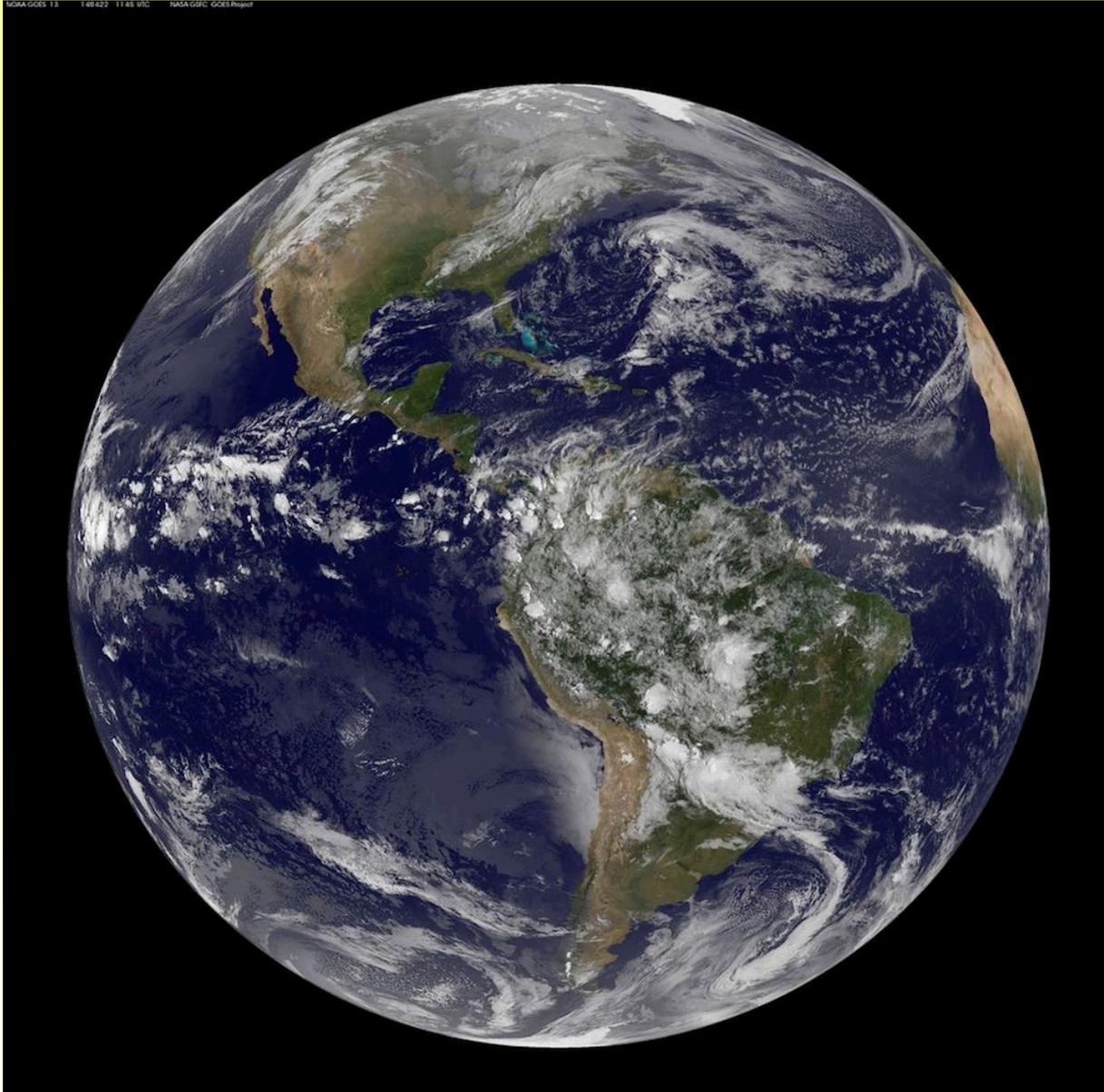


- ▶ Instabile Phase der jungen Sonne
- ▶ Gasströme von der Sonne bis in die äußeren Regionen des Sonnensystems geblasen → Sonnenwind
- ▶ Erdatmosphäre aus  $H_2$  oder He wäre zerstört worden

# Die Planeten des Sonnensystems



# Die Erde – der blaue Planet



## Herkunft des Wassers?

1. stammt aus dem Erdinneren → Magmentgasung
2. ist durch Impakte von Kometen oder wasser- bzw. eisreichen Asteroiden auf die Erde gekommen

# Earth and Moon Neighbors in Space



# Entstehung des Mondes: Giant impact theory

Planetenbillard im frühen Sonnensystem



**Kollisionstheorie** von [Hartmann](#) und [Davis](#) **1975:**

Marsgroßer Planetoid, der nach der Mutter der griechischen Mondgöttin **Selene** manchmal auch **Theia** genannt wird, kollidierte mit **Gaia** (Proto-Erde)

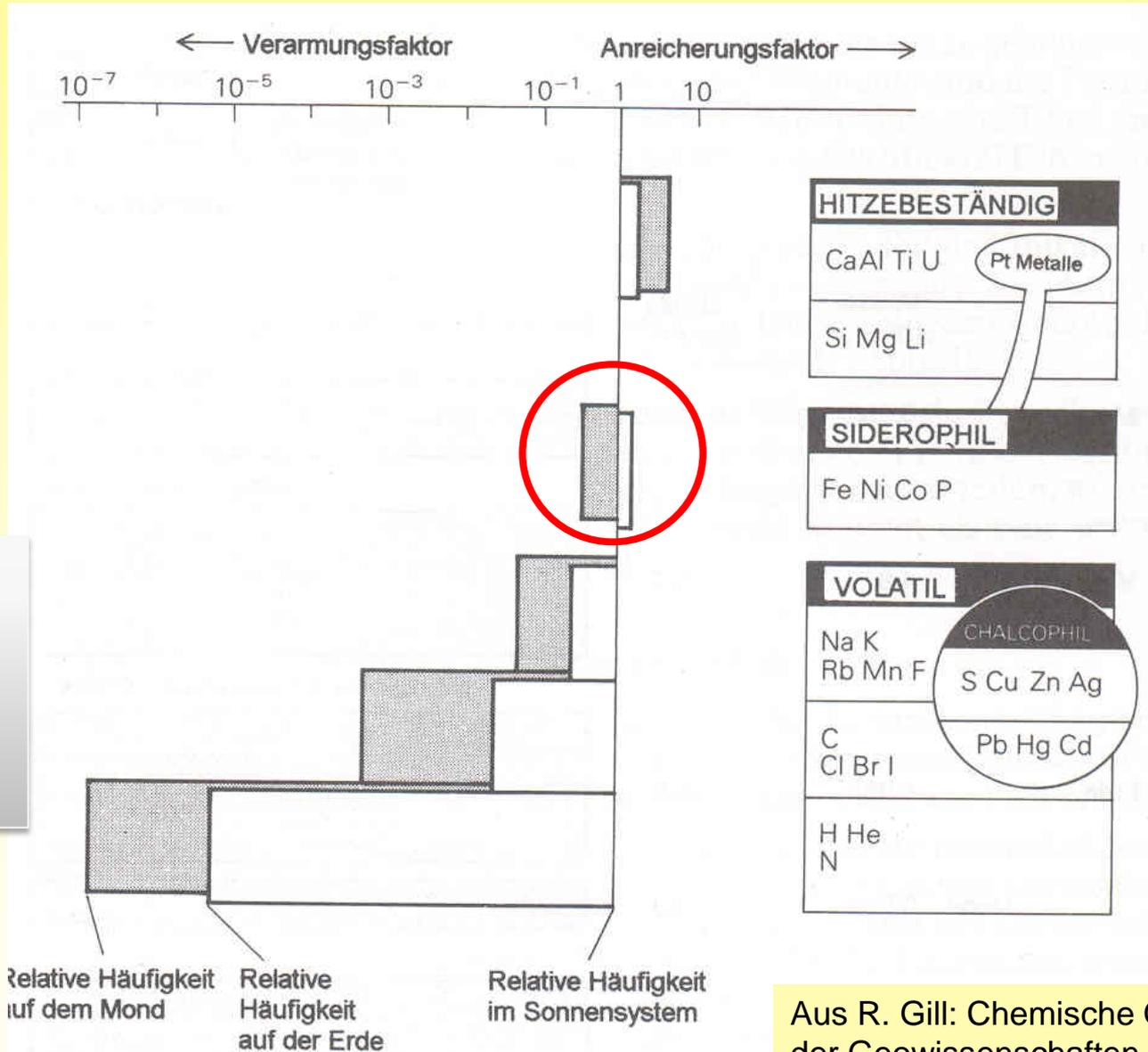
Aus den freigesetzten Materiemengen bildete sich der Mond

Elementanreicherung –verarmung auf **Erde** (weiß) und **Mond** (grau) im Vergleich mit den solaren Durchschnittshäufigkeiten

Volatil  
(flüchtig)

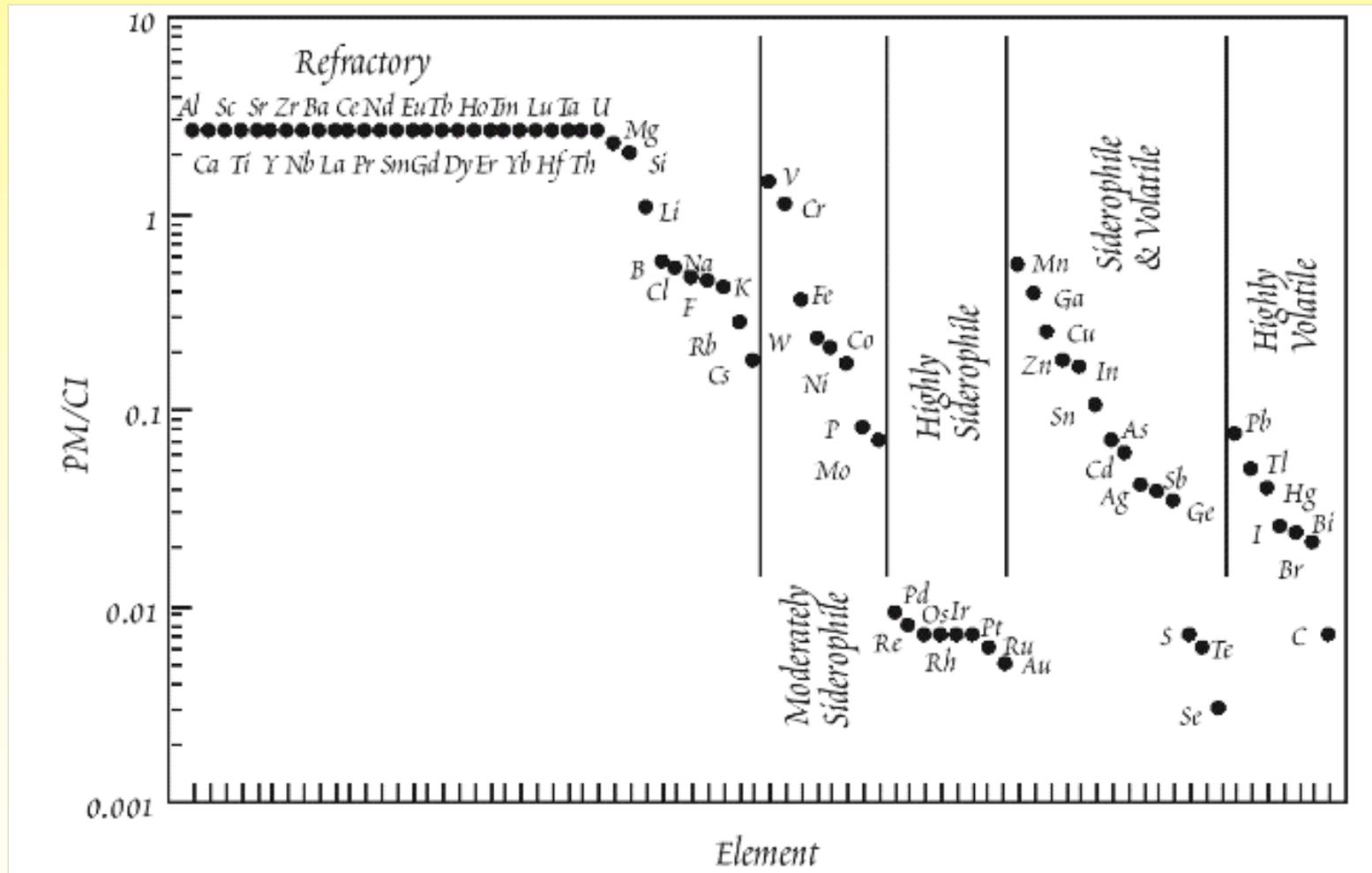
versus

Refraktär  
(hitzebeständig)

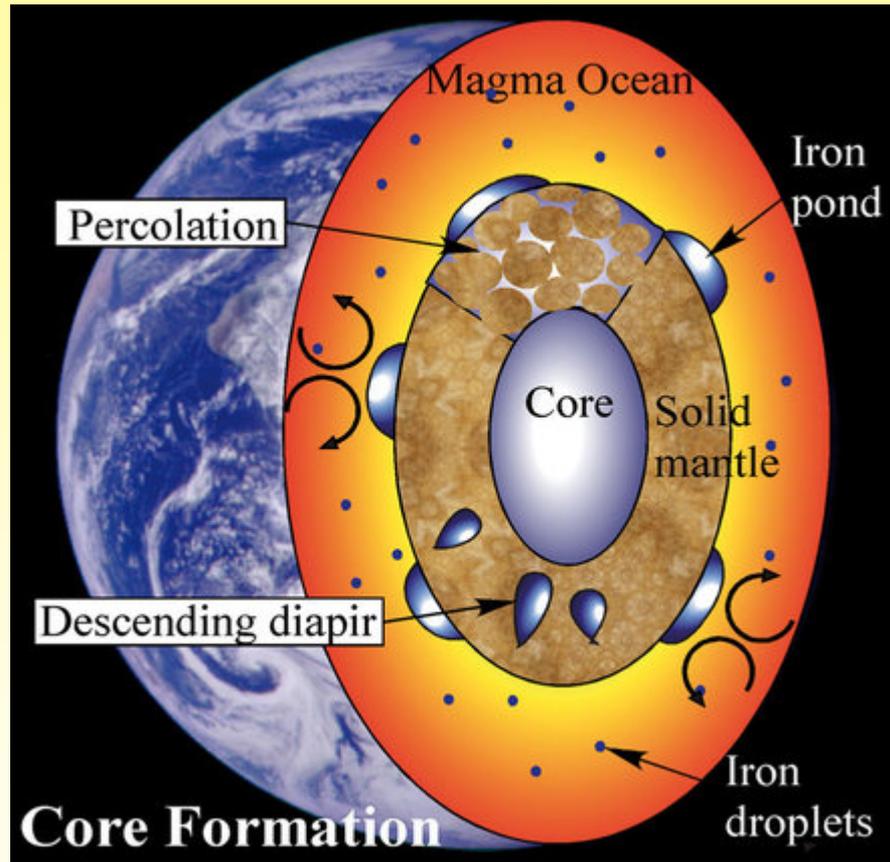


Kollision fand nach der Erdkernbildung statt

# Elementhäufigkeiten

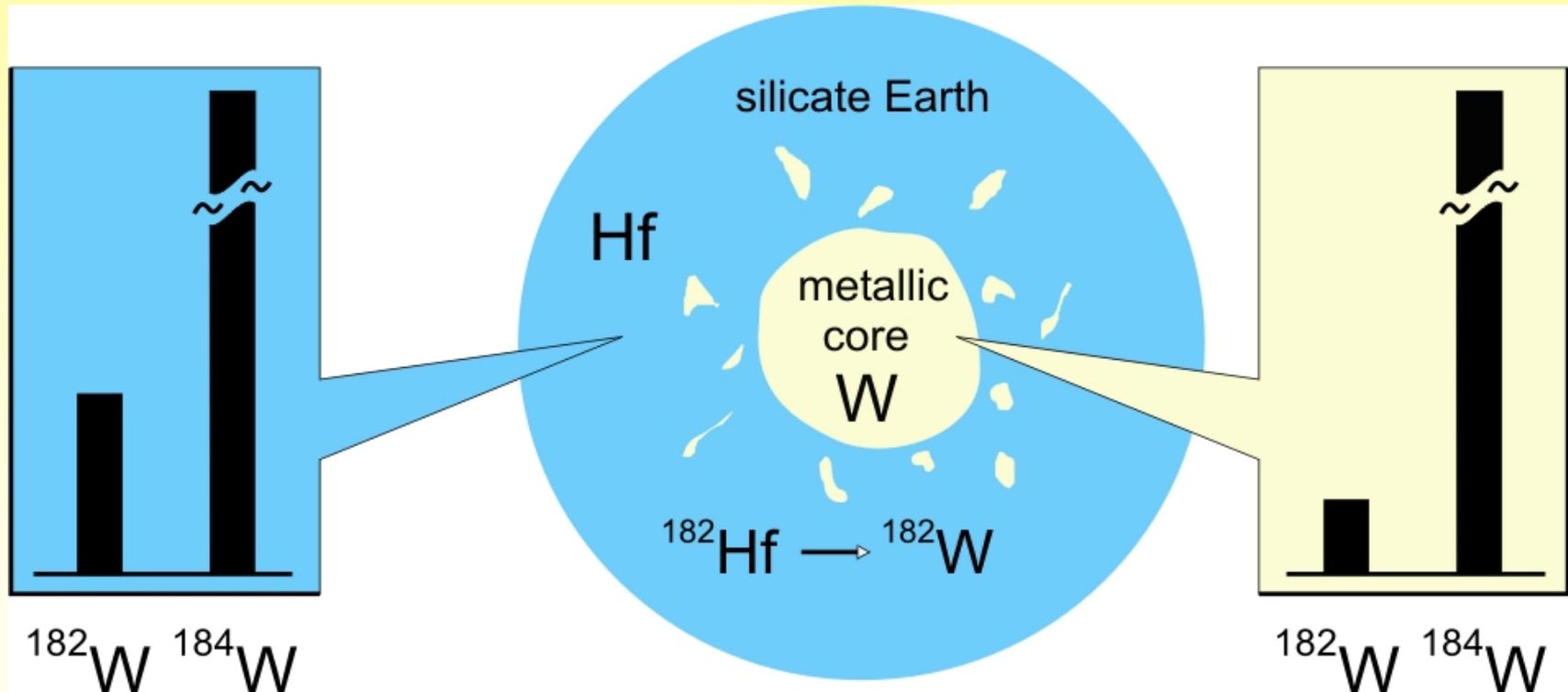


# Erdkernbildung



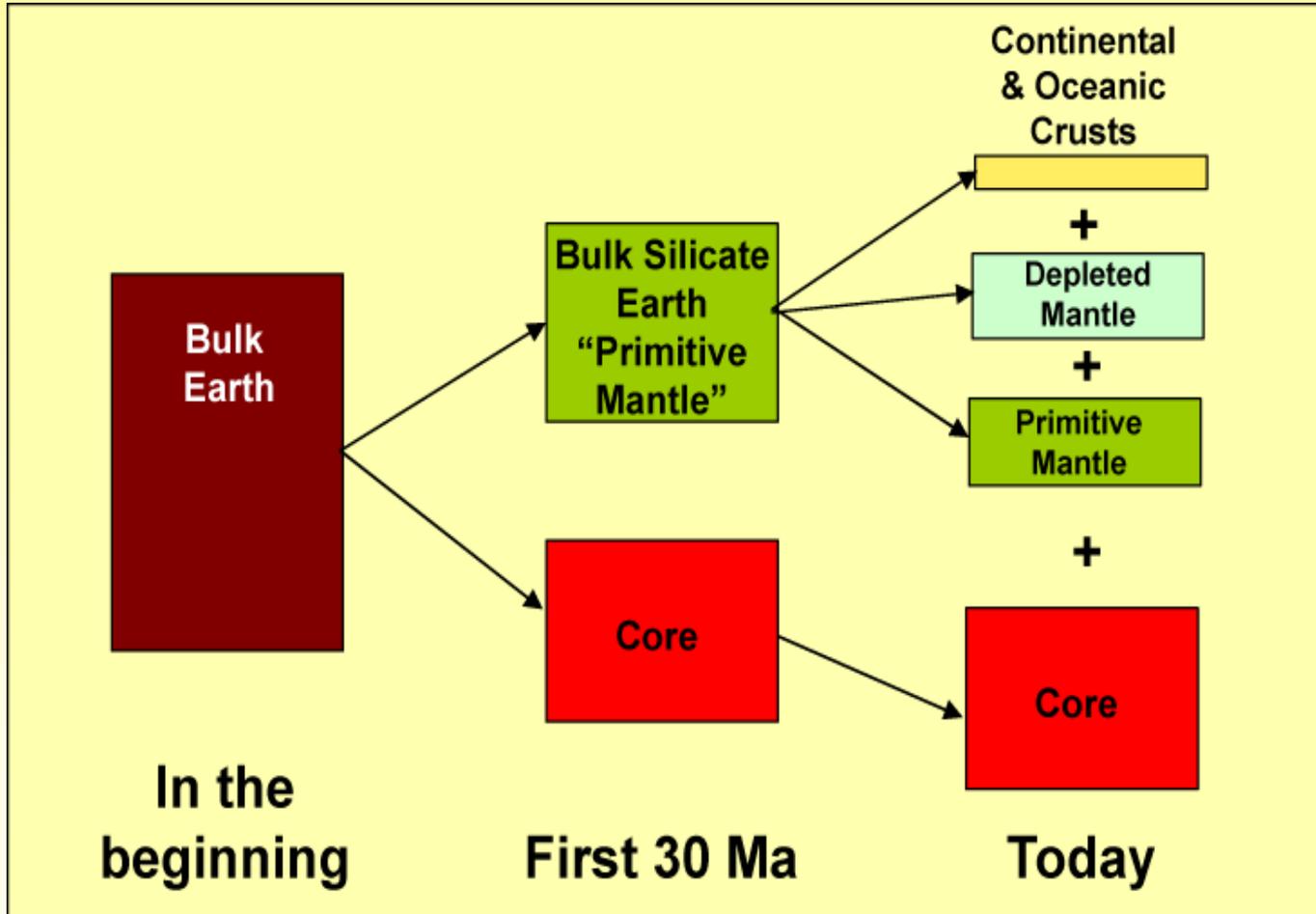
# Erdkernbildung

Erdkern war bereits weitgehend gebildet bevor  $^{182}\text{Hf}$  vollständig zerfallen war



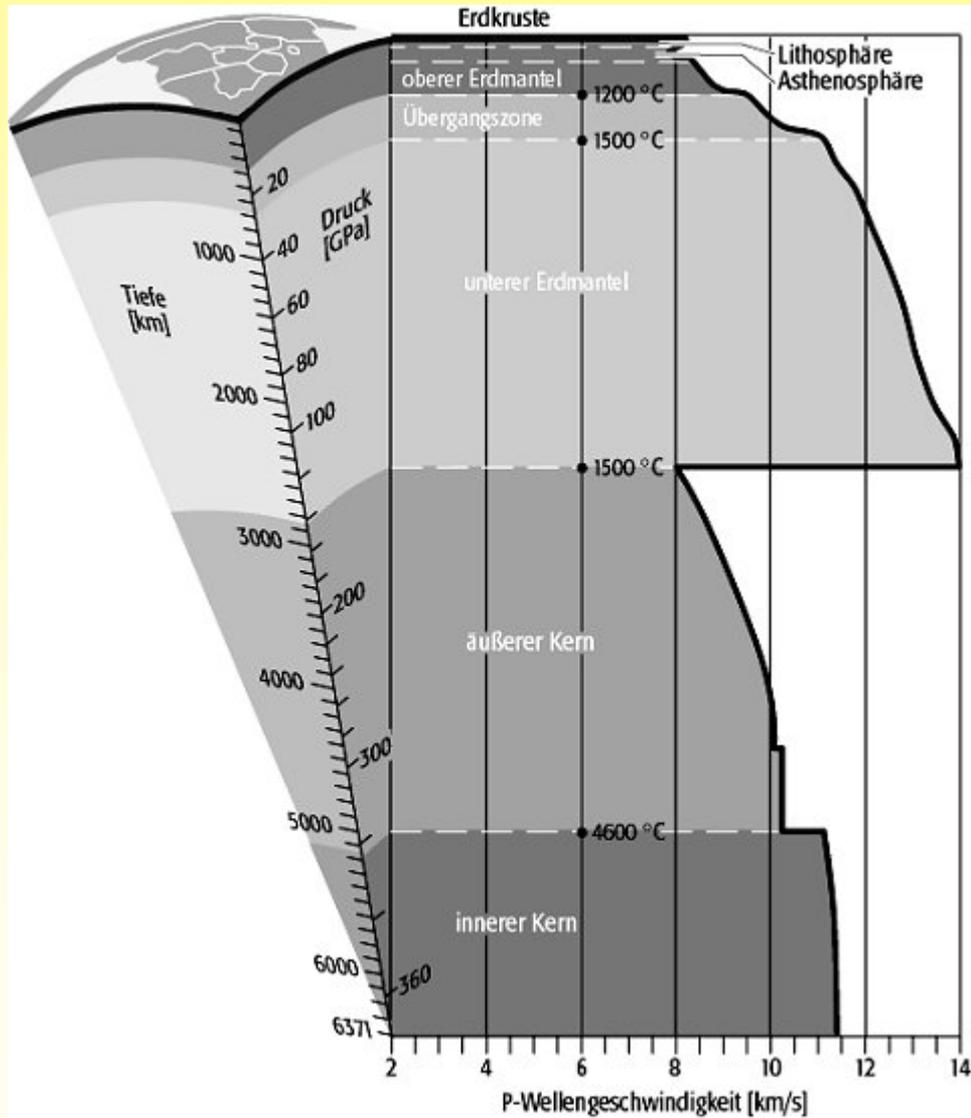
$^{182}\text{Hf}$  ausgestorben ( $t_{1/2} = 8.9$  Mio Jahre)

# Gliederung der Erde

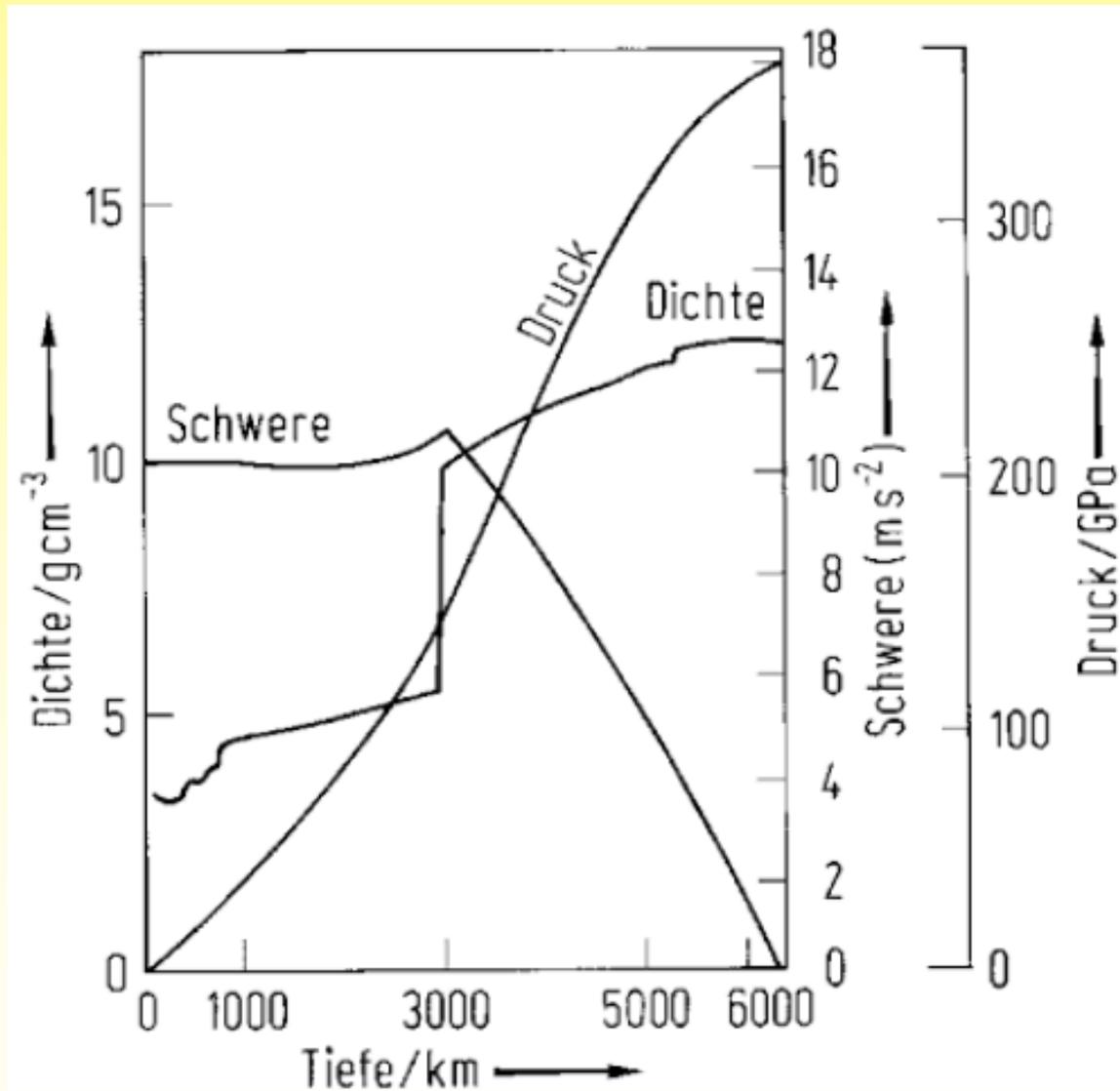


# Aufbau der Erde

## Seismische Wellen

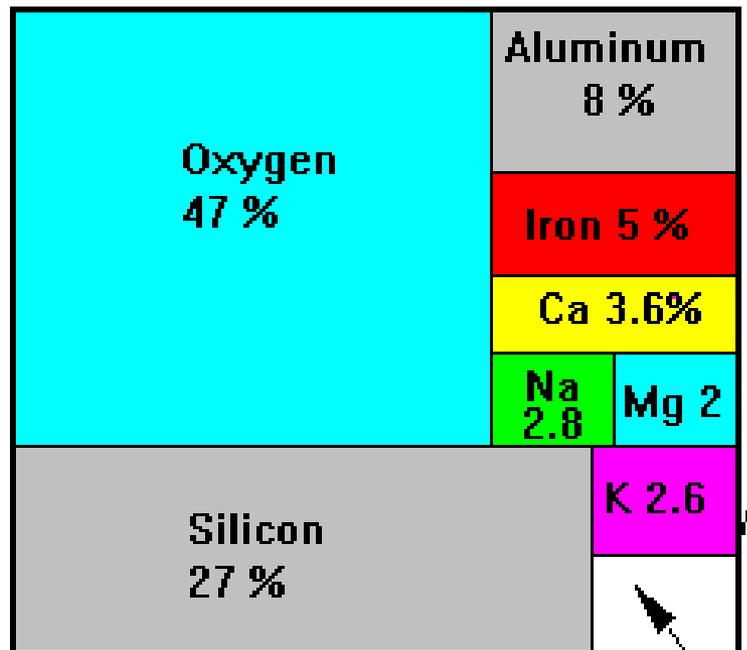


# Aufbau der Erde

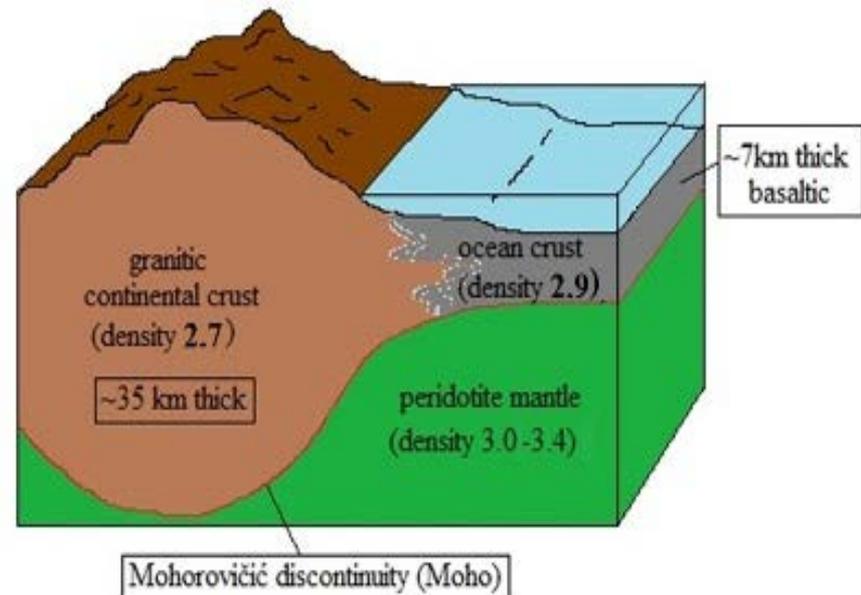


# Chemische Zusammensetzung der kontinentalen Kruste

Chemistry of Continental Crust by Weight

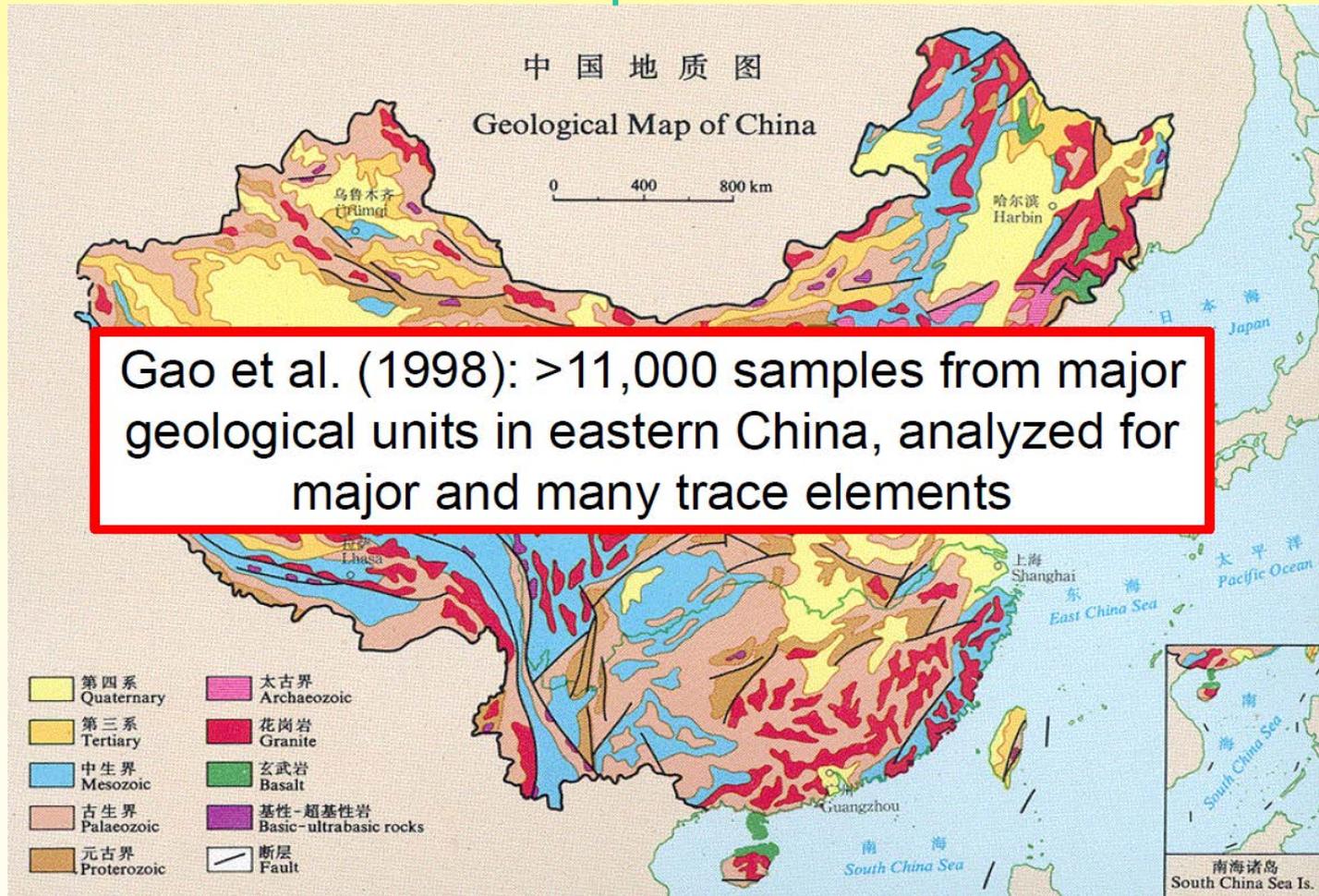


All other elements  
about 1 % or 10,000



# Wie ermittelt man die Zusammensetzung der Erdkruste?

## Rasterprobenahme



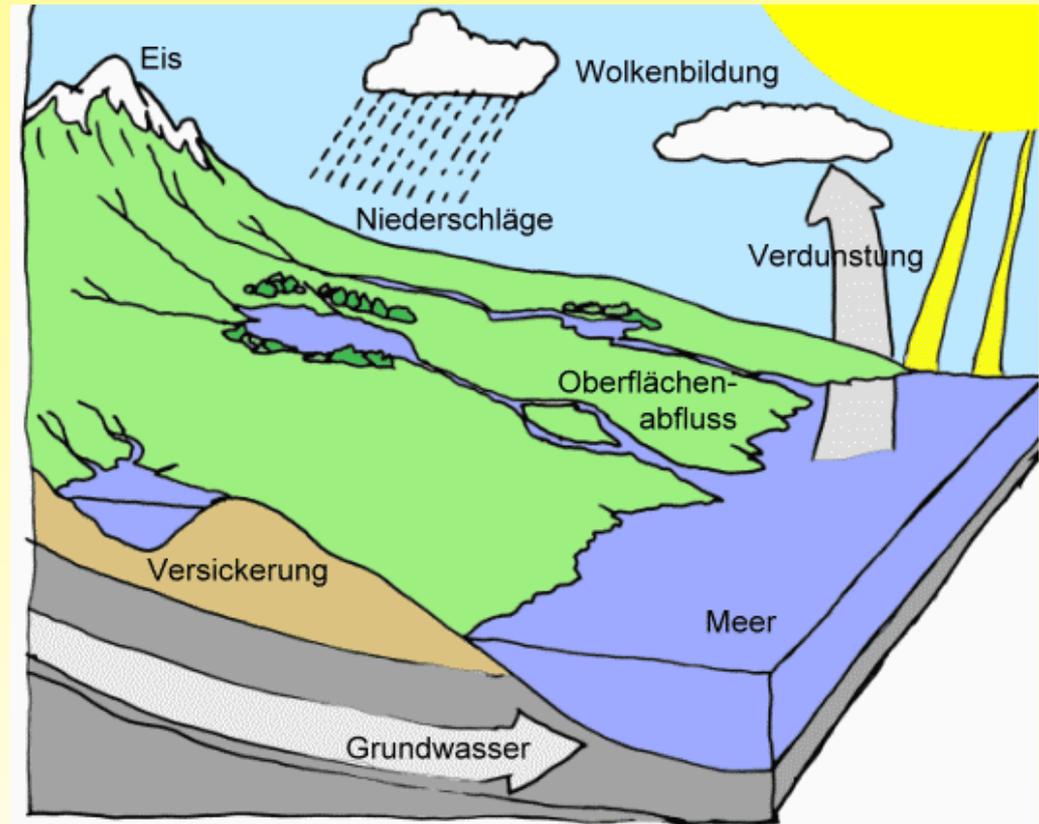
# Wie ermittelt man die Zusammensetzung der Erdkruste?

- Durchschnittswerte zahlreicher geochemischer Analysen (Clarke & Washington 1924)
- Gesteinstyp x rel. Häufigkeit
- Anteile saurer und mafischer Gesteine (Daly 1914)
- Sedimentanalyse
- Modellierung
- Glaziale Tone (Goldschmidt 1954)
- Meteorite (Steinmeteorite)

	<i>Wt. %</i>		<i>Wt. %</i>
O	45.5	Mg	3.2
Si	26.8	Na	2.3
Al	8.40	K	0.90
Fe	7.06	Ti	0.5
Ca	5.3		

# Elementumverteilungen

Verwitterungsprozesse,  
Fluid-Gesteins-  
Wechselwirkungen



Endstation  
Ozean?



# Element-Verweilzeiten

## Residence time calculations

Flux: amount, per unit time, added  
Reservoir: amount present



$$t = \frac{R}{F}$$

$$F_{in} \equiv F_{out} \quad (\text{assumed})$$

$$R = \text{constant} \quad (\text{steady-state})$$

## Residence time of Chloride in the Ocean

$$R (\text{amount}) = [Cl]_{sw} \times \text{Ocean Volume}$$

$$[Cl]_{sw} = 19 \text{ g/kg}$$

$$F (\text{river influx}) = [Cl]_{rw} \times \text{Global River Discharge}$$

$$[Cl]_{rw} \approx 6 \text{ mg/kg}$$

$$t = \frac{R}{F}$$

$$= \frac{[Cl]_{sw}}{[Cl]_{rw}} \times \frac{\text{Ocean Volume}}{\text{Global River Discharge}}$$

$$= \frac{19}{6 \times 10^{-3}} \times 4 \times 10^4$$

$$= 3 \times 10^3 \times 4 \times 10^4$$

$$= 1.2 \times 10^8 = 120 \text{ million years}$$

# Element-Verweilzeiten

**Table 7.3 Approximate Residence Times for Constituents of Seawater**

<b>Constituent</b>	<b>Residence Time (years)</b>
Chloride ( $\text{Cl}^2$ )	100,000,000
Sodium ( $\text{Na}^1$ )	68,000,000
Magnesium ( $\text{Mg}^{21}$ )	13,000,000
Potassium ( $\text{K}^1$ )	12,000,000
Sulfate ( $\text{SO}_4^{22}$ )	11,000,000
Calcium ( $\text{Ca}^{21}$ )	1,000,000
Carbonate ( $\text{CO}_3^{22}$ )	110,000
Silicon (Si)	20,000
Water ( $\text{H}_2\text{O}$ )	4,100
Manganese (Mn)	1,300
Aluminum (Al)	600
Iron (Fe)	200

*Sources:* Data from Broecker and Peng, 1982; Bruland, 1983; Riley and Skirrow, 1975.

Chemisches Gleichgewicht

Reaktionskinetik

Lösungen & Löslichkeit

# Löslichkeit der Elemente

...und Verteilung im Meerwasser

